



**David Rodrigues Serra Nunes**

## **Automação do Controlo de Passagem de Luz num Eixo Fotométrico**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Professora Doutora Helena Vítorovna Guitiss Navas,  
FCT-UNL

Coorientador: Doutor Olivier Pellegrino,  
Instituto Português da Qualidade

Coorientador: Mestre Carlos Pires,  
Instituto Português da Qualidade

Presidente: Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins

Arguentes: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos,  
Doutora Maria Isabel Araújo Godinho

Vogais: Professora Doutora Helena Vítorovna Guitiss Navas,  
Doutor Olivier Pellegrino



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2013**



Copyright, 2013, David Rodrigues Serra Nunes, FCT/UNL, IPQ e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e a todos os docentes que tive no decorrer do curso pela contribuição que tiveram na minha formação académica.

À Professora Doutora Helena Navas, pela disponibilidade e inúmeros conhecimentos transmitidos, não apenas como orientadora deste trabalho, como também ao longo de todo o meu percurso académico.

Aos meus coorientadores, Doutor Olivier Pellegrino e Mestre Carlos Pires, pela sua disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos e por terem possibilitado a realização deste trabalho através dum estágio curricular. Sem a sua orientação científica não teria sido possível a realização desta dissertação.

Aos restantes membros do Instituto Português da Qualidade pela partilha de conhecimentos e total disponibilidade.

Um agradecimento à minha família, em especial aos meus pais, Fernando e Olga, e a minha irmã, Catarina, pelo apoio incondicional, confiança, compreensão e paciência demonstrada ao longo deste trabalho, como em todo o meu percurso académico e de vida.

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração e apoio de um grande número de pessoas, em especial aos meus amigos Tommy, André Bandeira, André Luso, António Ramalho, Francisco Ramalho, Nuno Tomás e Rodrigo Roçadas pelo bem-estar, companheirismo, força, ajuda, dedicação e amizade não apenas no decorrer deste projeto como durante todo o meu percurso académico. Aos meus colegas e amigos que não foram mencionados, pela sua amizade e pelo apoio moral tantas vezes necessário nos dias menos produtivos.

Aqui fica o registo do meu agradecimento simples, mas sincero!



## **Resumo**

Devido à evolução científica e tecnológica dos instrumentos de medição, a complexidade dos processos de calibração tende a aumentar, bem como a exigência e rigor dos métodos utilizados.

O Instituto Português da Qualidade (IPQ), na procura contínua no aperfeiçoamento dos processos de calibração e controlo metrológico, estabeleceu como objetivo implementar um automatismo que permitisse ao Laboratório de Fotometria e Radiometria melhorar a realização dos ensaios de calibração de lâmpadas e luxímetros com a sua aplicação.

A presente dissertação, realizada no âmbito de um estágio curricular no IPQ, centrou-se na conceção e implementação de um automatismo capaz de controlar o movimento de abertura e fecho de um orifício, que permite a passagem de luz no banco fotométrico. Neste estudo, são apresentados todos os componentes utilizados no automatismo requerido, de modo a justificar e a viabilizar a solução encontrada.

A implementação deste automatismo permite ao Laboratório de Fotometria e Radiometria uma maior confiança nos resultados do processo de calibração de lâmpadas e luxímetros, aumentando, assim, a eficiência, minimizando os tempos mortos do processo e diminuindo a possibilidade de ocorrência de erros humanos, garantindo deste modo uma diminuição nas incertezas associadas.

## **Palavras-chave**

Automatismo, Calibração, Fotometria, Impressão 3D, Incerteza, LabVIEW

.





## **Abstract**

The complexity of calibration processes as well as the requirement and accuracy of used methods tends to increase due to the scientific and technological developments.

By taking an ongoing research to improve the processes of calibration and metrological control, the Portuguese Quality Institute (IPQ) has aimed to implement an automatism enabling the Laboratory of Photometry and Radiometry to improve testing of calibration lamps and luximeters with its application.

This dissertation, conducted under a traineeship at IPQ, has its focus on the design and implementation of an automatism that will be able to control the opening and closing movements of a certain aperture allowing the light passage in the photometric bench. Herein is presented all the components used in the required automation in order to justify and facilitate the solution found.

The implementation of this automated system allows the Laboratory of Photometry and Radiometry greater confidence in the process results of the calibration lamps and luximeters, thus increasing efficiency, minimizing process downtime and reducing the possibility of human error, ensuring a reduction in associated uncertainty.

## **Key-Words**

Automatism, Calibration, photometry, 3D Printing, Uncertainty, LabVIEW.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo da Dissertação .....	2
1.2	Estrutura e Organização da Dissertação .....	2
<b>2</b>	<b>Enquadramento .....</b>	<b>5</b>
2.1	História da Metrologia.....	5
2.2	Instituto Português da Qualidade.....	5
2.3	Áreas da Metrologia.....	6
2.4	Departamento de Metrologia.....	6
2.5	Laboratório de Fotometria e Radiometria.....	7
2.5.1	Fotometria .....	7
2.5.2	Competências do LFR.....	10
<b>3</b>	<b>Princípios de Avaliação de Incertezas da Medição .....</b>	<b>13</b>
3.1	Incerteza de Medição .....	13
3.2	Componentes da Incerteza.....	14
3.3	Avaliação da Incerteza.....	14
3.3.1	Método de avaliação de tipo A .....	15
3.3.2	Método de avaliação do tipo B .....	15
3.4	Cálculo da Incerteza Padrão da Grandeza de Saída.....	17
3.5	Incerteza da Medição Expandida.....	18
<b>4</b>	<b>Calibração de Lâmpadas e Luxímetros.....</b>	<b>21</b>
4.1	Medições em Fotometria no LFR.....	21
4.1.1	Fatores Humanos .....	21
4.1.2	Instalações e Condições de Trabalho .....	22
4.1.3	Equipamentos .....	22
4.1.4	Meios Experimentais no Laboratório de Fotometria .....	23
4.1.5	Ferramentas informáticas .....	27
4.2	Procedimento Experimental .....	27
4.2.1	Preparação prévia.....	27
4.2.2	Calibração de lâmpadas.....	28
4.2.3	Calibração de luxímetros.....	32
<b>5</b>	<b>Projeto do Automatismo.....</b>	<b>37</b>
5.1	Enquadramento do Automatismo.....	37
5.2	Conceção do Automatismo.....	38
5.2.1	Requisitos do automatismo .....	38
5.2.2	Especificações funcionais .....	38

5.2.3	Especificações tecnológicas .....	39
<b>6</b>	<b>Escolha dos Componentes.....</b>	<b>41</b>
6.1	Matriz de Decisão.....	41
6.1.1	Atuador elétrico .....	42
6.1.2	Servomotor .....	45
6.1.3	Placa de Controlo.....	50
<b>7</b>	<b>Chassi de Suporte do Automatismo.....</b>	<b>55</b>
7.1	Dimensionamento do Chassi de Suporte.....	55
7.2	Fabrico do Chassi .....	58
7.2.1	Introdução à impressão 3D.....	58
7.2.2	Processo <i>FDM</i> .....	59
7.2.3	Análise estrutural ao chassi de suporte do servomotor e da placa de controlo .....	65
7.2.4	Ficheiro em formato <i>STL</i> .....	77
7.2.5	Fabrico do protótipo.....	78
7.2.6	Fabrico dos componentes do chassi final .....	79
7.3	Fabrico do Acessório que Impede a Passagem de Luz.....	81
7.4	Conclusão .....	82
<b>8</b>	<b>Programação em LabVIEW .....</b>	<b>84</b>
8.1	Definição do Problema .....	84
8.2	Ambiente de Programação.....	84
8.2.1	Painel frontal .....	85
8.2.2	Diagrama de blocos.....	86
8.2.3	Conector de blocos.....	87
8.3	Método de Desenvolvimento do Programa em LabVIEW.....	87
8.3.1	Programa em LabVIEW para calibrar o servomotor .....	88
8.3.2	Programa em LabVIEW de controlo posicional do servomotor .....	93
<b>9</b>	<b>Análise ao Automatismo.....</b>	<b>100</b>
9.1	Validação dos Resultados pelos Procedimentos.....	100
9.1.1	Calibração de lâmpadas.....	100
9.1.2	Calibração de luxímetros.....	102
9.2	Comparação Intralaboratorial.....	104
9.2.1	Compatibilidade metrológica .....	104
9.2.2	Fidelidade de medição .....	106
<b>10</b>	<b>Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....</b>	<b>109</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>111</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>115</b>
	Anexo I.....	117

Anexo II.....	119
Anexo III.....	121



## Índice Figuras

Figura 2.1 - Atribuições do Departamento de Metrologia .....	6
Figura 2.2 – Espectro eletromagnético [49] .....	8
Figura 2.3- Diferença entre radiometria e fotometria .....	8
Figura 2.4 – Curvas CIE escotópica e fotópica (adaptado de [6]) .....	9
Figura 2.5 – Grandezas fotométricas (adaptado de [6]) .....	9
Figura 3.1 - Distribuição normal .....	16
Figura 3.2 - Distribuição retangular .....	17
Figura 3.3 - Distribuição triangular .....	17
Figura 4.1 - Laser modelo 31008 fabricados pela REO.....	22
Figura 4.2 - Suportes ajustáveis.....	23
Figura 4.3 - Leitores/codificadores digitais .....	23
Figura 4.4 - Wi 41 G e LIS 175-325.....	24
Figura 4.5 - Fotómetro padrão P 15 F0T da LMT .....	24
Figura 4.6 - Lâmpadas secundárias do laboratório, da esquerda para a direita: a) 50 W, b) 250 W e c) 1000W.....	25
Figura 4.7 - Fonte de alimentação Bouhnik .....	25
Figura 4.8 - Multímetros da Agilent modelo 34401A .....	26
Figura 4.9 – Interface com o utilizador do codificador digital <i>RSF Elektronik</i> .....	26
Figura 4.10 - <i>Hart Scientific</i> modelo 1620 .....	27
Figura 4.11 - Esquema de montagem do sistema de medição para a calibração de lâmpadas/luxímetros.....	28
Figura 4.12 - Plano de referência do luxímetro .....	33
Figura 5.1 - Sistema manual atual.....	37
Figura 5.2 - Estrutura de um sistema automático. (adaptado de [17]).....	38
Figura 5.3 - Soluções possíveis: a) translação vertical; b) translação horizontal; c) rotação .....	39
Figura 6.1 - Atuadores elétricos [22] .....	42
Figura 6.2 - Árvore modelo aplicada à escolha do atuador elétrico.....	44
Figura 6.3 - Árvore de objetivos aplicada à escolha do atuador elétrico .....	44
Figura 6.4 - Constituintes de um servomotor .....	46
Figura 6.5 - Árvore modelo aplicada à escolha do servomotor .....	48
Figura 6.6 - Árvore de objetivos aplicada à escolha do servomotor .....	48
Figura 6.7 - Árvore modelo aplicada à escolha da placa de controlo .....	51

Figura 6.8 - Árvore de objetivos aplicada à escolha da placa de controlo .....	52
Figura 7.1 - Sequência de projeto .....	55
Figura 7.2 - Modelo SW1.....	56
Figura 7.3 - Modelo SW2.....	57
Figura 7.4 - Modelo SW3.....	57
Figura 7.5 - Modelo SW final.....	57
Figura 7.6 - Vista explodida da montagem do modelo SW final.....	58
Figura 7.7 - Princípio do processo <i>FDM</i> da <i>Stratasys</i> (adaptado de VOLPATO et al., 2007). .....	59
Figura 7.8 - Orientação de posição do filamento [34] .....	60
Figura 7.9 - Ensaio de tração [34] .....	62
Figura 7.10 – Ensaio de compressão [34].....	62
Figura 7.11 - Fixação A .....	68
Figura 7.12 - Fixação B .....	69
Figura 7.13 - Fixação C.....	69
Figura 7.14 - Contactos <i>bonded</i> .....	70
Figura 7.15 - Forças aplicadas sobre todos os componentes. (Dimensões em mm) .....	71
Figura 7.16 - Chassi com acessórios de substituição rígidos.....	71
Figura 7.17 - Pormenor do elemento sólido linear .....	72
Figura 7.18 - Análise para a tensão máxima com elementos “ <i>draft</i> ” .....	73
Figura 7.19 - Análise para a tensão máxima com elementos “ <i>high</i> ” .....	73
Figura 7.20 - Deslocamento máximo com elementos “ <i>draft</i> ” .....	74
Figura 7.21 - Deslocamento máximo com elementos “ <i>high</i> ” .....	74
Figura 7.22 - Tensão máxima do chassi.....	76
Figura 7.23 - Deslocamento máximo do chassi.....	76
Figura 7.24 - Aspeto dos modelos <i>STL</i> gerados .....	78
Figura 7.25 – <i>Reprap</i> .....	78
Figura 7.26 - Peça protótipo .....	79
Figura 7.27 - <i>Dimension Elite</i> .....	79
Figura 7.28 - Interface do programa informático <i>CATALYST EX</i> .....	80
Figura 7.29 - Material de suporte.....	81
Figura 7.30 – Acessório .....	81
Figura 7.31 - Irregularidades das peças impressas .....	82
Figura 7.32 - Resultado da peça final .....	82



Figura 8.1 - À esquerda programação com linhas de comando e à direita através de ícones .....	85
Figura 8.2 - Painel frontal.....	85
Figura 8.3 - Menu de controlos.....	86
Figura 8.4 - Diagrama de blocos .....	86
Figura 8.5 - Menu de funções .....	87
Figura 8.6 - <i>Open Phidget</i> .....	88
Figura 8.7 - <i>Event execution</i> .....	88
Figura 8.8 - <i>ClosePhidget.vi</i> .....	88
Figura 8.9 - Interface do programa informático da <i>Phidgets</i> .....	89
Figura 8.10 - <i>PhidgetOpen.vi</i> .....	89
Figura 8.11 - <i>ServoCount.vi</i> .....	90
Figura 8.12 - <i>While loop</i> .....	90
Figura 8.13 - <i>ServoGetPos.vi</i> .....	91
Figura 8.14 - <i>ClosePhidget.vi</i> .....	91
Figura 8.15 - Diagrama de blocos do programa para calibrar o servo .....	92
Figura 8.16 - Painel frontal do programa para calibrar o servomotor .....	92
Figura 8.17 – Secção do programa de recolha de dados para a calibração de lâmpadas e luxímetros, em LabVIEW.....	94
Figura 8.18 - A: Parte do programa original que emite sinal sonoro para o operador destapar o orifício. ....	94
Figura 8.19 - <i>Flat Sequence Structure</i> .....	95
Figura 8.20 - <i>SetPar.vi</i> .....	95
Figura 8.21 - <i>TimeDelay.vi</i> .....	96
Figura 8.22 - <i>Display Message to Use.vi</i> .....	96
Figura 8.23 - Diagrama de blocos do programa de controlo posicional angular do servomotor ..	97
Figura 8.24 - Servomotor posicionado de maneira a não permitir a passagem de luz no banco fotométrico .....	98
Figura 8.25 - Painel frontal do programa de controlo posicional angular do servomotor .....	98
Figura 8.26 - Interface de todo o programa, em linguagem LabVIEW, de calibração de lâmpadas e luxímetros no IPQ.....	99
Figura 9.1- Análise da repetibilidade.....	107



## Índice de tabelas

Tabela 1- Serviços que o LFR disponibiliza [7] .....	11
Tabela 2 – Números de graus de liberdade em função do fator de expansão [9] .....	19
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens de atuadores .....	40
Tabela 4 - Classificação simples.....	42
Tabela 5 - Classificação simples e justificação. ....	43
Tabela 6 - Matriz de decisão aplicado à escolha do atuador elétrico .....	45
Tabela 7 - Critérios de avaliação servomotor .....	47
Tabela 8 - Classificação simples.....	48
Tabela 9 - Matriz decisão aplicada à escolha do servomotor .....	49
Tabela 10 - Especificações técnicas do <i>Hitec HS-322HD</i> [27].....	50
Tabela 11 - Critérios de avaliação da placa de controlo.....	51
Tabela 12 - Classificação simples.....	51
Tabela 13 - Matriz de decisão aplicada à escolha da placa de controlo .....	53
Tabela 14 - Especificações técnicas da <i>PhidgetServo 1-Motor</i> [28] .....	54
Tabela 15 - Descrição das <i>Features</i> utilizadas.....	56
Tabela 16 - Parâmetros da impressora [34] .....	61
Tabela 17 - Propriedades elásticas do filamento <i>ABS-P400</i> [35] .....	63
Tabela 18 - Módulo de elasticidade [35] .....	63
Tabela 19 - Módulo de elasticidade com orientação <i>Criss-cross</i> .....	64
Tabela 20 - Relações retiradas dos ensaios efetuados [33] [34] .....	64
Tabela 21 – Relações entre Injeção em molde de <i>ABS</i> e <i>FDM</i> .....	67
Tabela 22 - Propriedades mecânicas do <i>ABSPlus-P430</i> em peças fabricadas pelo processo <i>FDM</i> .....	67
Tabela 23 - Forças aplicadas sobre a estrutura .....	70
Tabela 24 - Ficheiros <i>STL</i> gerados.....	78
Tabela 25- Comparação dos resultados.....	93
Tabela 26- Especificações metrológicas das lâmpadas padrão primário .....	100
Tabela 27 - Balanço de incertezas da sequência de medições para a lâmpada padrão 56 .....	101
Tabela 28 - Resultados .....	102
Tabela 29 – Intensidade da lâmpada a calibrar .....	102
Tabela 30 - Diferença relativa.....	102
Tabela 31 - Especificações metrológicas das lâmpadas de trabalho .....	103

Tabela 32 - Balanço de incertezas da sequência de medições para a lâmpada de trabalho 6332 .....	103
Tabela 33 - Erro sobre a iluminância lida pelo luxímetro em calibração em relação ao valor referênciada iluminância para cada lâmpada de trabalho .....	104
Tabela 34 - Valores com o automatismo .....	105
Tabela 35 - Valores de referência .....	105
Tabela I.1 – Resultados dos ensaios de tração .....	113
Tabela I.2 - Resultados dos ensaios de compressão.....	113
Tabela II.1- Fixação do Tipo A .....	115
Tabela II.2 - Fixação do Tipo B .....	115
Tabela II.3 - Fixação do Tipo C.....	115
Tabela III.1- Dispersão dos valores medidos.....	117

## Acrónimos e Siglas

ABS	<i>Acrilonitrila Butadieno Estireno</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CIE	<i>Commission INternationale de l'Éclairage ; International Commission on Illumination</i>
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
EN	<i>European Standards</i>
EURAMET	<i>European Association of National Metrology Institutes</i>
FCT	Faculdade Ciências e Tecnologia
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LFR	Laboratório de Fotometria e Radiometria
LNM	Laboratório Nacional de Metrologia
MEF	Método dos Elementos Finitos
NI	<i>National Instruments</i>
NP	Norma Portuguesa
PWM	<i>Pulse With Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
SLI	<i>Slice</i>
SQP	Sistema Português da Qualidade
STL	<i>Stereolithographic Tessellation Language</i>
UMCA	Unidade de Metrologia Científica e Aplicada
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VI	<i>Virtual Instruments</i>



## Simbologia

$\nu$	Coeficiente de <i>Poisson</i>
$c_i$	Coeficiente de sensibilidade
$\alpha\Delta t$	Correção devido ao tempo de utilização da lâmpada padrão primário
$S$	Desvio padrão
$d_{Lamp-luxí}$	Distância entre o plano de referência do filamento da lâmpada e o plano de referência do luxímetro
$D_{Lamp-luxí}$	Distância entre o plano de referência do filamento da lâmpada e o plano das distâncias do luxímetro
$\varepsilon$	Distância entre o plano de referência do luxímetro e o da origem das distâncias do luxímetro em calibração
$kw(\theta)$	Erro de alinhamento em torno do eixo horizontal e perpendicular ao do banco fotométrico
$hw(\phi)$	Erro de alinhamento em torno do eixo vertical e perpendicular ao do banco fotométrico
$E_n$	Erro normalizado
$e$	Erro sobre a iluminância
$m_l$	Expoente da variação relativa da intensidade luminosa de lâmpadas de incandescência com a variação relativa da intensidade da corrente elétrica da alimentação
$c_m$	Fator de calibração do multímetro, dado pelo respectivo certificado de calibração
$k$	Fator de expansão
$X_i$	Grandeza de entrada
$Y$	Grandeza de saída
$I_S$	Grandeza de saída, intensidade luminosa da lâmpada a calibrar
$E_{luxí}$	Iluminância lida no mostrador do luxímetro em calibração
$U$	Incerteza de medição expandida
$u_i$	Incerteza padrão
$u_c(y)$	Incerteza padrão combinada
$r$	Limite de repetibilidade
$V_{f,s}$	Média das tensões elétricas devido à fotocorrente produzida pelo fotômetro com o

	orifício aberto, menos a média das tensões elétricas nos terminais da lâmpada com o orifício fechado para a lâmpada a calibrar
$V_{f,P}$	Média das tensões elétricas devido à fotocorrente produzida pelo fotômetro com o orifício aberto, menos a média das tensões elétricas nos terminais da lâmpada com o orifício fechado para a lâmpada padrão
$G$	Módulo de torsão
$\nu_{ef}$	Número de graus de liberdade efetivo
$n$	Número de observações
$I_R$	Valor da corrente elétrica da lâmpada padrão primário, dada pelo respectivo certificado de calibração
$a$	Valor da incerteza apresentada
$I_P$ ou $I_R$	Valor da intensidade luminosa da lâmpada padrão primário
$R_{padrão}$	Valor da resistência elétrica padrão, dada pelo seu certificado de calibração
$V_R$	Valor de referência
$x_{ref}$	Valor de referência
$E_{ref}$	Valor de referência da iluminância
$I_{ref}$	Valor de referência da intensidade luminosa da lâmpada de trabalho, dada pelo seu certificado de calibração
$V_M$	Valor medido
$\bar{q}$	Valor médio
$U_{R,P}$	Valor medio da tensão elétrica nos terminais da resistência padrão da lâmpada padrão primário
$q$	Valor obtido
$S_{ri}^2$	Variância da repetibilidade



# 1 Introdução

Desde dezembro de 2005, o Laboratório de Fotometria e Radiometria (LFR) do Instituto Português da Qualidade (IPQ), o Laboratório Nacional de Metrologia de Portugal (LNM), tem os instrumentos de medição e instalações para a manutenção do padrão nacional da candela, a unidade da intensidade luminosa e o desenvolvimento dos padrões metrológicos nacionais de fotometria. No âmbito da norma NP EN ISO/IEC 17025, o LFR efetua calibrações de lâmpadas em intensidade luminosa e de luxímetros, em iluminância [1].

O IPQ, na procura continuada de aperfeiçoamento dos processos de calibração e controlo metrológico, pretende implementar um automatismo que irá permitir ao LFR melhorar a realização de ensaios de calibração de lâmpadas e luxímetros a partir da sua aplicação, permitindo uma maior confiança nos resultados, aumentando a eficiência, minimizando os tempos mortos no processo de calibração, diminuindo a componente de incerteza associada aos operadores, garantindo uma diminuição da incerteza total de medição.

Deste modo, efetuou-se um projeto que consiste na conceção e implementação de um automatismo aplicado à calibração de lâmpadas e luxímetros no LFR, que tem a função de automatizar o movimento de abertura e fecho de um orifício circular com um que atualmente é efetuado por um operador. Este orifício está situado no eixo fotométrico de medição da intensidade luminosa de uma lâmpada emissora. Um sensor no banco fotométrico tem como finalidade, quando o orifício está fechado, medir a radiação luminosa parasita que o detetor recebe de origens diferentes da lâmpada, processo essencial para garantir uma boa medição no processo de calibração de lâmpadas e luxímetros.

Após um processo de conceção e implementação do automatismo e da sua construção, colocou-se em funcionamento e procedeu-se a caracterização metrológica do sistema com aplicação prática à calibração de lâmpadas e luxímetros. Uma avaliação quantitativa dos resultados obtidos antes e depois da implementação do automatismo permitiu certificar-se da coerência do trabalho efetuado. Foi também proposta uma estimativa da componente de incerteza do processo de calibração associada à intervenção dos operadores, o que permitiu uma estimativa da qualidade do trabalho efetuado.

## 1.1 Objetivo da Dissertação

Esta dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento e implementação de um automatismo com aplicação direta à calibração de lâmpadas e luxímetros no LFR do IPQ.

Para a concretização deste objetivo, foram realizadas as seguintes tarefas:

Tarefa A – Ambientação à metrologia fotométrica fundamental dos processos de calibração de lâmpadas e luxímetros e do balanço de incertezas associadas.

Tarefa B – Projeção do automatismo de controlo da passagem de luz no eixo de um banco fotométrico.

Tarefa C – Análise e aquisição dos componentes que melhor se adaptam ao automatismo.

Tarefa D – Estudo, desenvolvimento e implementação do programa de controlo através da linguagem de programação LabVIEW.

Tarefa E – Estudo, desenvolvimento e construção dos componentes que constituem o automatismo.

Tarefa F – Implementação e caracterização metrológica do automatismo com aplicação prática à calibração de lâmpadas e luxímetros.

## 1.2 Estrutura e Organização da Dissertação

A presente dissertação foi dividida em 10 capítulos:

A “*Introdução*”, onde se apresenta o trabalho realizado e algumas definições importantes para a realização do trabalho.

No segundo capítulo, designado por “*Enquadramento*”, inclui-se informação que pretende dar a conhecer as Estruturas da Qualidade do País, o Sistema Português da Qualidade, o Instituto Português da Qualidade e as áreas onde atua. Neste mesmo capítulo, apresenta-se também o Laboratório de Fotometria do IPQ, onde o automatismo deste projeto será aplicado.

No terceiro capítulo, designado por “*Princípios de Avaliação de Incertezas de Medição*”, descreve-se sucintamente como avaliar a incerteza de medição e as suas componentes.

No quarto capítulo, designado por “*Calibração de Lâmpadas e Luxímetros*”, resume-se como efetuar a calibração de lâmpadas e luxímetros, assim como as instalações, condições de trabalho, equipamentos e meios experimentais do Laboratório de Fotometria.

No quinto capítulo, designado por “*Projeto do Automatismo*”, descreve-se o enquadramento do projeto assim como os requisitos de projeto e todos os processos que contribuíram para a conceção do automatismo.

No sexto capítulo, designado por “*Aquisição dos Componentes*”, apresenta-se o método escolhido para a decisão dos componentes do automatismo dentro da oferta disponível, de modo a apresentar a melhor escolha possível.

O sétimo capítulo, “*Chassi de Suporte do Automatismo*”, tem como objetivo descrever o processo de desenvolvimento do chassi do automatismo. Desde a sua conceção até ao seu fabrico, compreendendo todos os parâmetros que influenciam todos estes processos.

No oitavo capítulo, “*Programação em LabVIEW*”, descreve-se o processo de programação da placa de controlo do atuador de modo a controlar a passagem de luz no banco fotométrico do LFR.

No nono capítulo, “*Validação do Automatismo*”, apresenta-se os processos de validação do automatismo no LFR.

Para finalizar no décimo capítulo, designado por “*Conclusões*”, apresenta-se uma breve conclusão dos diversos pontos considerados importantes durante esta dissertação.



## 2 Enquadramento

Desde o início da civilização que existiu a necessidade de usar padrões e medidas uniformizadas para o comércio, construções e outras. Com o desenvolvimento tecnológico, científico e económico, a metrologia teve desenvolvimentos a nível da globalização e normalização de processos e medições. A metrologia tornou-se numa atividade fundamental e indispensável nas sociedades modernas. Podemos assim encontrar a metrologia associada a tarefas do nosso dia-a-dia, desde a balança que é usada para pesar no mercado, ao controlo de velocidade nas estradas e aos contadores de água e gás que estão instalados nas nossas casas.

### 2.1 História da Metrologia

Em Portugal, os padrões de pesos e medidas têm início com a própria origem do país, no século XII, não existindo rutura com os padrões das civilizações então existentes no território, sistemas de medida Romano e Árabe [2].

Em 1253, foi criada a primeira lei nacional da metrologia com o nome de Lei da almotaçaria, sendo o primeiro marco histórico estrutural e uniformizador, que definiu as unidades legais e a autoridade competente para o controlo metrológico [2].

Devido à influência das sociedades europeias, não esquecendo as unidades portuguesas tradicionais, adotou-se uma nova reforma no reinado de D. João VI, sendo o sistema de unidades definido, obedecendo ao sistema métrico decimal e estabelecendo a equivalência da unidade de volume às de comprimento e de peso [2].

Na ocasião da Exposição Universal de Paris, em 1867 foi criado um *Comité dos Pesos e Medidas e da Moeda*, com o objetivo de uma maior uniformização das medidas. Em 1875, o governo francês convocou a “Conferência Diplomática do Metro” e a 20 de Maio, do mesmo ano, dezassete países assinaram a “Convenção do Metro”, entre os quais Portugal [2].

A convenção do metro é um tratado que criou o *Bureau International des Poids et Mesures*, uma organização intergovernamental sob a autoridade da *Conferência Geral de Pesos e Medidas* e supervisão do *Comité Internacional de Pesos e Medidas*, que atualmente é composta por 55 estados-membros.

### 2.2 Instituto Português da Qualidade

Enquanto organismo nacional, o IPQ é a entidade responsável pela coordenação geral e desenvolvimento do Sistema Português da Qualidade (SPQ), bem como de outros sistemas de qualificação no domínio regulamentar, que lhe sejam conferidos por lei. O IPQ fomenta e coordena

atividades que visam colaborar para que os agentes económicos possam aperfeiçoar a sua atuação e demonstrar a credibilidade da sua ação no mercado, através da qualificação de pessoas, de produtos, de serviços e de sistemas. No âmbito do SPQ, o IPQ é a instituição responsável, em Portugal, pelo desenvolvimento e coordenação de atividades de Normalização, Qualificação e Metrologia e pela gestão de programas de apoio financeiro, intervindo ainda na cooperação com outros países no domínio da Qualidade. No âmbito regulamentar, o IPQ é ainda responsável pelo controlo metrológico em Portugal e pelo processo comunitário de notificação prévia de normas e regras técnicas. No que respeita à participação a nível internacional, o IPQ assegura a representação de Portugal em inúmeras estruturas europeias e internacionais relevantes para a sua missão [3].

## 2.3 Áreas da Metrologia

A metrologia está dividida em várias categorias com diferentes níveis de objetivos e complexidade. As principais atribuições do departamento de Metrologia encontram-se na Figura 2.1 seguinte.



Figura 2.1 - Atribuições do Departamento de Metrologia

A Metrologia Científica tem a missão de efetuar os padrões nacionais das unidades de medida, cooperar em comparações internacionais, participar em projetos de desenvolvimento metrológico. A Metrologia Aplicada tem por objetivo garantir a rastreabilidade dos resultados de medição obtidos em laboratórios do país a padrões de referência por meio de calibrações e verificações dos instrumentos de medição e a realização de comparações nacionais. A Metrologia Legal elabora a legislação metrológica e promove a sua aplicação, aprova modelos de instrumentos de medição, qualifica e acompanha entidades para a realização de operações de controlo metrológico, realiza ações de formação na área de controlo metrológico.

## 2.4 Departamento de Metrologia

Na prossecução das suas atribuições e responsabilidades enquanto Laboratório Nacional de Metrologia (LNM) sob a superintendência do Departamento de Metrologia do IPQ, o LNM tem como principais objetivos [4]:

- Coordenar, desenvolver e manter os Padrões Nacionais de Medida; conservando os que estão na sua posse, garantindo a sua rastreabilidade internacional;
- Organizar a cadeia hierarquizada dos padrões de referência das entidades integradas no Subsistema da Metrologia;
- Participar nas organizações internacionais de metrologia fundamental, aplicada e industrial;
- Participar em ensaios internacionais de comparação interlaboratoriais;
- Implementar com o Serviço de Acreditação os ensaios nacionais de comparação dos padrões de referência dos laboratórios metrológicos acreditados;
- Apoiar tecnicamente as operações de controlo metrológico efetuadas pelo Serviço de Metrologia Legal;
- Promover a articulação com as universidades e centros de saber nacionais e internacionais para o desenvolvimento da Metrologia nacional no contexto europeu.

Os domínios de atividade do LNM são [4]:

- Comprimento e Ângulo;
- Fotometria, Radiometria e Radiofrequências;
- Quantidade de Matéria, Eletroquímica e Gases de Referência;
- Massa, Força e Pressão;
- Propriedades de Líquidos;
- Temperatura e Humidade;
- Tempo e Frequência;
- Volume;
- Eletricidade;
- Vibrações.

## **2.5 Laboratório de Fotometria e Radiometria**

### **2.5.1 Fotometria**

O espectro eletromagnético é uma representação da radiação eletromagnética em função da sua frequência. É possível dividir o espectro eletromagnético em várias secções, como se pode observar na Figura 2.2. A zona visível do espectro incluem as radiações para as quais possuímos a capacidade de traduzir a sua ressecção por sensações específicas, cores. A constituição do olho humano permite diferenciar a sucessão de radiações cujas frequências se situam entre  $4,0 \times 10^{14}$  Hz (extremo vermelho) e  $8,0 \times 10^{14}$  Hz (extremo violeta).

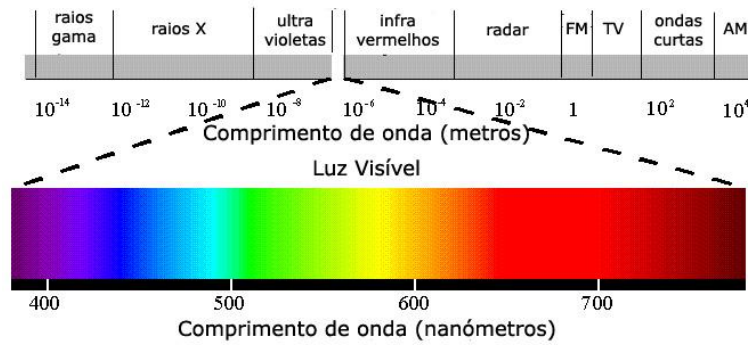


Figura 2.2 – Espectro eletromagnético [49]

A Temperatura de Cor expressa o aspecto da cor da luz emitida por uma fonte de luz. Essa definição está fundamentada na relação entre a temperatura de um material, conhecido como "corpo negro radiador", e a distribuição de energia da luz emitida à medida que a temperatura do corpo negro é elevada a partir do zero absoluto.

A unidade de medida da temperatura de cor é o kelvin (K). Quanto mais alta a temperatura de cor, mais clara é a tonalidade de cor da luz.

Segundo a *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE), a temperatura da cor de uma lâmpada com filamento de tungstênio é de 2856 K, sendo a temperatura utilizada para as aplicações de fotometria que utilizam lâmpadas incandescentes [5].

A fotometria dedica-se à medição da luz visível tal como ela é percebida pelo olho humano. Por sua vez, a radiometria é a ciência que se dedica ao estudo das transferências de energia radiativa. Dedica-se à medição da radiação ótica desde o ultravioleta até ao infravermelho. A distinção entre radiometria e fotometria é necessária porque o olho humano responde de maneira diferente aos diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

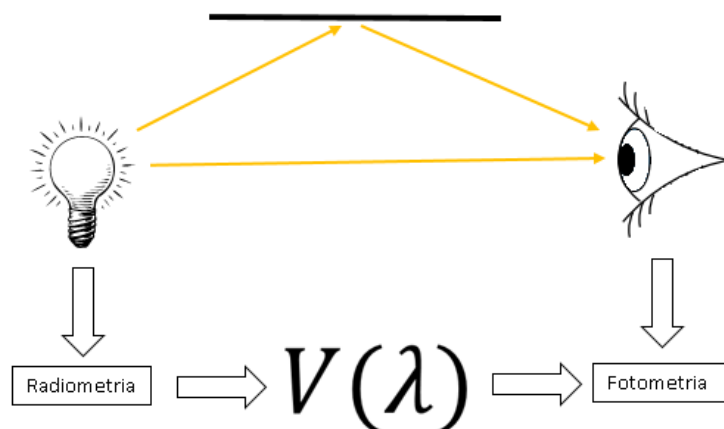


Figura 2.3- Diferença entre radiometria e fotometria



A curva de sensibilidade espectral do olho humano descreve a sensibilidade espectral média da percepção visual humana consoante as condições de iluminação. Esta curva definida pela CIE é descrita pela função  $V(\lambda)$ , Figura 2.4, que deve ser usada para converter a energia radiante em energia visível. A visão fotópica é usada para condições bem iluminadas enquanto a visão escotópica é usada em condições de escuridão.

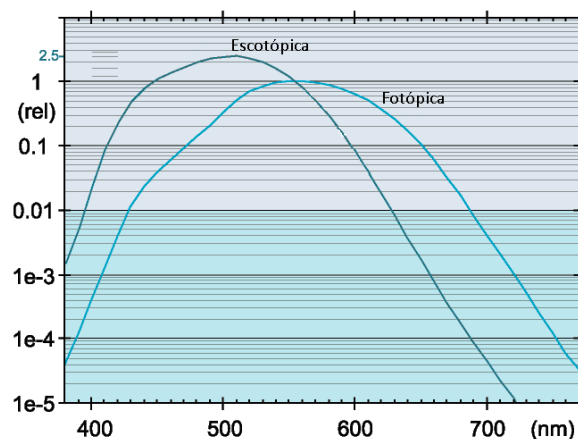


Figura 2.4 – Curvas CIE escotópica e fotópica (adaptado de [6])

A candela, uma das sete unidades de base do Sistema Internacional das unidades de medida (SI), é a intensidade luminosa, numa direção, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  hertz e cuja intensidade energética é de  $1/683$  watt por esterradiano (16.<sup>a</sup> Conferência Geral de Pesos e Medidas, Resolução 3, 1979), ou seja, ângulo sólido formado por um cone tal que a área da esfera de raio unitário interna ao cone tenha o valor de um metro quadrado [6].

O lúmen é o fluxo luminoso emitido por uma fonte pontual uniforme tendo uma intensidade luminosa de 1 candela. (9.<sup>a</sup> Conferência Geral de Pesos e Medidas, Resolução 7, 1948).

A iluminância, lux, corresponde à incidência perpendicular de 1 lúmen em uma área  $1 \text{ m}^2$ , como se ilustra na Figura 2.5.

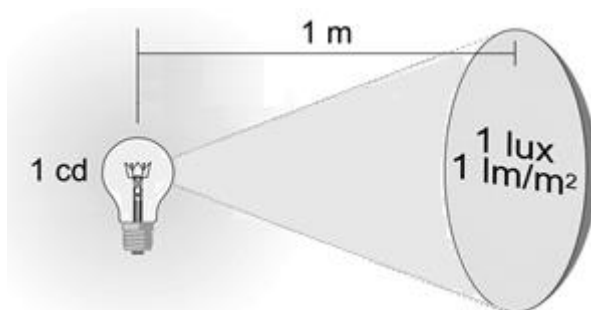


Figura 2.5 – Grandezas fotométricas (adaptado de [6])

### **2.5.2 Competências do LFR**

O LFR do IPQ é reconhecido como topo da cadeia da rastreabilidade em Portugal no domínio da Fotometria, Radiometria, Refratometria e Radiofrequências.

Desde dezembro de 2005, existem, no Laboratório de Fotometria do IPQ, os meios para que este Laboratório seja um Laboratório Primário em Fotometria [1].

No domínio da fotometria, o LFR efetua calibrações das lâmpadas e fotodetetores.

No domínio da espectrofotometria, o serviço de calibração é baseado sobre dois espectrofotómetros assim como padrões de fatores de transmissão e de comprimento de onda [1].

No domínio da Refratometria, o Laboratório é responsável pelo desenvolvimento de padrões nacionais de Índice de Refração, incumbindo-lhe designadamente calibrações de refratómetros para fase líquida, certificações de soluções padrão de refratómetros e ensaios de Controlo Metrológico dos refratómetros [7].

No domínio das radiofrequências, o laboratório efetua os ensaios de controlo metrológico dos cinemómetros utilizados para fiscalização dos limites de velocidade rodoviária e efetua a calibração dos cinemómetros, como os recetores GPS, utilizados como instrumentos de medição de velocidade de veículos rodoviários [7].

Os serviços que o LFR disponibiliza encontram-se na Tabela 1, ilustrada abaixo.

Tabela 1- Serviços que o LFR disponibiliza [7]

<b>Calibração</b>		
<b>Instrumento de medição</b>	<b>Intervalo de medição</b>	<b>Incerteza expandida</b>
<b>Lâmpadas</b>	50 cd a 1000 cd	1,5 %
<b>Luxímetros</b>	5 lx a 1000 lx	1,5 %
<b>Espectrofotômetros para transmissão regular</b>	1,0 % a 90,0 %	0,3 %
<b>Recetores GPS para medição de velocidades</b>	até 250 km/h	0,5 km/h
<b>Cinemómetros</b>	até 250 km/h	1 km/h
<b>Refratômetros para fase líquida</b>	$1,320\ 00 \leq n \leq 1,580\ 00$	0,1 %
<b>Certificação</b>		
<b>Material de Referência</b>	<b>Intervalo de medição</b>	<b>Incerteza expandida</b>
<b>Filtros de fatores de transmissão</b>	380 nm a 780 nm	0,2 nm
<b>Soluções padrão de índice de refração</b>	$1,320\ 00 \leq n \leq 1,580\ 00$	0,02 %
<b>Controlo Metrológico</b>		
<b>Instrumentos de medição</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Legislação</b>
<b>Cinemómetros</b>	Aprovação de modelo	Portaria nº 1542 / 2007 de 6 de dezembro
	Primeira verificação	
<b>Refratômetros para o mosto das uvas</b>	Verificação periódica	Portaria nº 1548 / 2007 de 7 de dezembro
	Verificação extraordinária	



### 3 Princípios de Avaliação de Incertezas da Medição

Quando se efetua uma medição num laboratório, existe um erro associado ao valor medido. O valor correspondente a essa medição é uma aproximação ao valor real.

Em trabalhos experimentais, é impraticável que não ocorram erros. Deste modo, é impossível obter um valor de medição que seja igual ao valor “real”. O erro de medição só podia ser eliminado se a grandeza que se pretende medir fosse perfeitamente definida e estável, e fosse medida com um sistema de medição perfeito, e se o valor “real” também fosse conhecido, o que na prática é impossível.

O erro de medição, Equação 3.1, é a diferença entre o valor medido,  $V_M$ , e um valor de referência,  $V_R$ .

$$\text{Erro de medição} = V_M - V_R \quad \text{Equação 3.1}$$

Para o erro de medição, contribuem dois tipos de erros [8]:

- Erro aleatório – componente do erro de medição que em medições repetidas varia de forma imprevisível. O valor de referência para um erro aleatório é a média que resultaria de um número infinito de medições repetidas da mesma mensuranda;
- Erro sistemático – componente do erro de medição que em medições repetidas permanece constante ou varia de uma forma previsível. O valor de referência para um erro sistemático é um valor verdadeiro, ou um valor medido de um padrão de incerteza de medição desprezável, ou um valor convencional. O erro sistemático e as suas causas podem ser conhecidos ou desconhecidos.

#### 3.1 Incerteza de Medição

Quando se efetua a medição de uma mensuranda, o resultado que se obtém é uma estimativa do valor verdadeiro da mensuranda.

A mensuranda é a grandeza que se pretende medir [8]. Usualmente, na calibração apenas se trabalha com uma mensuranda ou grandeza de saída  $Y$ , que depende de um determinado número de grandezas de entrada,  $X_i (i=1, 2, \dots, N)$  respeitando a seguinte relação:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \text{Equação 3.2}$$

Todos os resultados de medição são expressos por um valor de uma grandeza e de uma incerteza associada. Estas incertezas podem ser determinadas diretamente na medição, como avaliações baseadas na experiência e correções às indicações de instrumentos, ou procedem de origens externas à medição, como as grandezas associadas aos padrões de medição calibrados [9].

A incerteza é considerada como o grau de confiança associado à medição da mensuranda, i.e., quanto menor a incerteza mais credibilidade científica tem o valor medido. A incerteza de medição é o parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores da grandeza que são atribuídos à mensuranda a partir das informações usadas [8]. Para determinar a estimativa da incerteza de medição, usa-se o procedimento descrito no GUM [9]:

- Expressar em termos matemáticos a dependência da mensuranda ( $Y$ ) em relação às grandezas de entrada ( $X_i$ );
- Listar todas os componentes de incerteza;
- Avaliar o tipo de incerteza (A ou B);
- Calcular a incerteza-padrão para de cada componente da incerteza;
- Calcular os respectivos coeficientes de sensibilidade;
- Calcular a incerteza combinada;
- Calcular o fator de expansão  $k$ ;
- Determinar a incerteza expandida.

### 3.2 Componentes da Incerteza

A grandeza de entrada consiste na grandeza cujo valor pode ser obtido para calcular um valor medido de uma mensuranda [8]. O modo de determinação do valor da grandeza, como a incerteza associada a este valor permite reunir as grandezas de entrada  $X_{i\text{ em }}$  categorias [10] :

- As grandezas cuja estimativa e incerteza associadas são determinadas diretamente na medição. Estes valores podem ser obtidos, por exemplo, de uma simples observação, de observações repetidas, ou de avaliação baseada na experiência. Podem envolver a determinação de correções às indicações de instrumentos, bem como as correções das grandezas de influência, como sejam a temperatura ambiente, a pressão atmosférica ou a humidade relativa;
- As grandezas cuja estimativa e incerteza associadas são provenientes de origem externas à medição, tais como as grandezas associadas aos padrões de medição calibrados, aos materiais de referência certificados ou aos dados de referência obtidos de manuais.

### 3.3 Avaliação da Incerteza

A incerteza de medição relacionada às estimativas das grandezas de entrada é avaliada de acordo com o método de avaliação “Tipo A” ou “Tipo B”:

- Tipo A: Avaliação através da análise estatística de séries de observações;
- Tipo B: Avaliação por métodos de análise não estatística de séries de observações.

### 3.3.1 Método de avaliação de tipo A

Este método de avaliação é feito a partir da análise estatística de uma série de observações da grandeza medida, onde os resultados da medição são obtidos em condições de medição especificadas. Este tipo de componente de incerteza é obtida através do cálculo do desvio padrão e a sua incerteza padrão  $u$  é dada pela seguinte expressão [9] [11]:

$$u(x_i) = s(\bar{q}) \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad \text{Equação 3.4}$$

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

- $s(q)$  - Desvio padrão
- $n$  - Número de observações
- $\bar{q}$  - Média aritmética dos valores observados  $q_j (j=1,2,...,n)$

### 3.3.2 Método de avaliação do tipo B

Este método de avaliação baseia-se numa análise científica, que se assenta em todos os elementos disponíveis sobre uma possível variabilidade da grandeza de entrada, sendo alguns exemplos deste tipo os valores são provenientes de:

- Dados de medições prévias;
- Experiência de/ou conhecimento geral do comportamento da mensuranda da instrumentação, das propriedades de materiais e das técnicas de medição;
- Dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados;
- Especificações de fabricantes;
- Incertezas atribuídas a dados de referência obtidas em manuais ou outras publicações.

Para diferentes tipos de valores aplicam-se diferentes distribuições de probabilidades com por exemplo: Distribuição normal, Distribuição retangular, Distribuição triangular.

### 3.3.2.1 Distribuição normal

Em uma distribuição normal, como se apresenta na Figura 3.1, quando a estimativa  $X_i$  é retirada de certificados de calibração, especificações de fabricantes ou de outras incertezas padrão, a incerteza é obtida através da divisão desse valor de incerteza pelo valor do fator de expansão,  $k$ . A incerteza-padrão associada é dada pela Equação 3.6 [12]:

$$u(x_i) = \frac{a}{k} \quad \text{Equação 3.6}$$

Em que:

- $a$  - Valor da incerteza apresentada
- $k$  - Fator de expansão

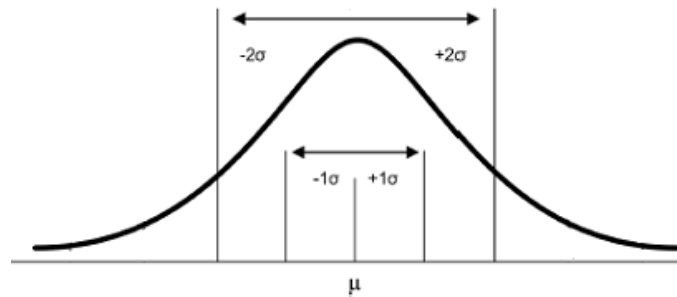


Figura 3.1 - Distribuição normal

### 3.3.2.2 Distribuição retangular

A probabilidade de um valor da componente estar dentro de um intervalo de  $a_-$  até  $a_+$  (valores limites inferior e superior da grandeza  $X_i$ , respectivamente), para todos os fins práticos, é igual a 1 e igual a zero, caso esteja fora deste intervalo.

A distribuição retangular ou uniforme é uma distribuição de probabilidade contínua de frequência constante, com capacidade de gerar valores dentro de um intervalo de medição Figura 3.2. Esta distribuição é geralmente usada na avaliação da incerteza de medição do tipo B quando se constata a falta de informação sobre a grandeza de entrada, assumindo-se que valor da grandeza se encontra num intervalo  $a_-$  até  $a_+$ . Neste caso a incerteza-padrão associada é dada por [12]:

$$u(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{12}} \quad \text{Equação 3.7}$$



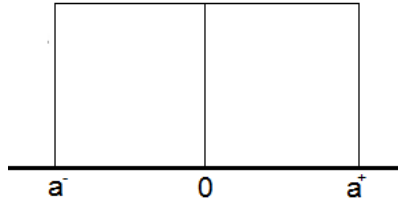


Figura 3.2 - Distribuição retangular

### 3.3.2.3 Distribuição triangular

A distribuição triangular, apresentada na Figura 3.3, associada a distribuições de incerteza que têm maior probabilidade de ocorrência nas proximidades do valor central. Se  $2a$  corresponde à largura do intervalo de valores atribuíveis à distribuição triangular de incerteza, a incerteza-padrão é dada por [12]:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

Equação 3.8

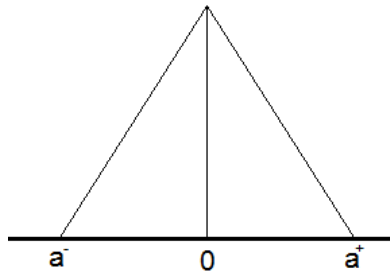


Figura 3.3 - Distribuição triangular

## 3.4 Cálculo da Incerteza Padrão da Grandeza de Saída

Se as grandezas de entrada são correlacionadas entre si, o quadrado da incerteza padrão da estimativa da grandeza de saída  $y$  é dado por:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$$

Equação 3.9

Portanto, o contributo para a incerteza-padrão  $u_i(y)$  associada a estimativa de saída  $y$  é dada pelo produto da incerteza padrão associada à estimativa de entrada  $x_i$  multiplicada por coeficiente de sensibilidade [12], de acordo com:

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad \text{Equação 3.10}$$

O coeficiente de sensibilidade ( $c_i$ ) descreve como a grandeza estimada de saída  $y$  é influenciada pelas variações de cada uma das estimativas das grandezas de entrada  $x_i$ , isto é, trata-se da derivada da função modelo  $y$  em relação a  $X_i$ , avaliada nas estimativas  $x_i$  da grandeza de entrada. Para cada parâmetro, a derivada parcial do modelo matemático avalia a mudança na estimativa de saída  $y$ , devido à mudança na estimativa de entrada  $x_i$  [9], Equação 3.11:

$$c_i(y(x_i)) = \frac{\partial y}{\partial x_i}_{X_1=x_1 \dots X_n=x_n} \quad \text{Equação 3.11}$$

A incerteza-padrão combinada  $u_c(y)$  é a raiz quadrada positiva da soma quadrática da incertezas-padrão de todos os componentes que contribuem para a estimativa da incerteza da medição.

Quando existe correlação entre as grandezas de entrada,  $X_i$  e  $X_j$ , usa-se uma fórmula de propagação de incertezas abrangendo as covariâncias como contribuição para a incerteza, segundo:

$$u_c(y(x_1, \dots, x_n)) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u(x_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=n-1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \left( \frac{\partial y}{\partial x_j} \right) \text{cov}(x_{ij})} \quad \text{Equação 3.12}$$

Nesta equação, os  $x_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) correspondem às contribuições que influenciam o resultado da medição,  $u(x_i)$  são as incertezas associadas e  $\text{cov}(x_{ij})$  as covariâncias entre  $x_i$  e  $x_j$ .

Quando todos os parâmetros que possuem uma contribuição para o resultado da medição são independentes, o termo da co-variância é zero.

Todas as contribuições devem ter as mesmas unidades da mensuranda, havendo necessidade de efetuar conversões em algumas situações [9].

### 3.5 Incerteza da Medição Expandida

A incerteza de medição expandida  $U$ , consiste no produto do valor da incerteza combinada,  $u_c(y)$ , por um fator de expansão,  $k$ , segundo [9]:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad \text{Equação 3.13}$$

A estimativa do fator de expansão  $k$  corresponde a uma determinada probabilidade expandida que tenha em conta a fiabilidade da incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída  $y$ .

O número de graus de liberdade efetivo  $\nu_{ef}$  da incerteza padrão é calculado pela fórmula de *Welch-Satterthwaite*, segundo [9]:

$$v_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad \text{Equação 3.14}$$

Em que  $u_i(y)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) definidos pela equação acima são as contribuições para a incerteza padrão da estimativa de saída  $y$ , resultante das incertezas padrão das estimativas de entrada  $x_i$ , assumidas serem estatisticamente e mutuamente independentes e  $v_i$  o número de graus de liberdade efetivos do componente da incerteza padrão  $u_i(y)$ .

Para a obtenção da incerteza combinada, pode recorrer-se à combinação de vários tipos de distribuição. Usualmente utiliza-se a distribuição *t-Student* para a probabilidade expandida e para o número de graus de liberdade efetivo. Quando se têm um número de graus de liberdade efetivo elevado, a distribuição *t-Student* aproxima-se da distribuição normal e o valor de  $k$  deverá ser 2 ou 3 para intervalos de confiança de 95 % ou 99 %.

Para uma incerteza-padrão obtida pela avaliação do Tipo B, os graus de liberdade são mais difíceis de calcular. Sendo assim, sempre que possível considera-se os graus de liberdade da incerteza padrão  $u(x_i)$  tendem para infinito, para uma distribuição de probabilidades retangular. Quando se considera a incerteza-padrão associada à utilização de instrumentos de medição ou padrões calibrados, e quando no certificado de calibração não se fizer referência ao número de graus de liberdade efetivos da calibração mas somente ao fator de expansão  $k = 2$ , deve-se assumir que o número de graus de liberdade efetivo é igual a 50 [9]

Na Tabela 2, encontra-se como varia o fator de expansão relativamente aos números de graus de liberdade efetivo.

Tabela 2 – Números de graus de liberdade em função do fator de expansão [9]

$v_{ef}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	$\infty$
$k$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

O resultado completo da medição consiste na estimativa  $y$  da mensuranda e na incerteza expandida associada  $U$  segundo [9] [11]:

$$Y = y \pm U \quad \text{Equação 3.15}$$

O valor obtido indica que a melhor estimativa para a mensuranda  $Y$  é  $y$  com  $[y-U; y+U]$ , estando neste intervalo os valores atribuídos a  $Y$ .



## **4 Calibração de Lâmpadas e Luxímetros**

Desde dezembro de 2005, o Laboratório de Fotometria do Instituto Português da Qualidade, o Laboratório Nacional de Metrologia de Portugal, tem os instrumentos de medição e as instalações instrumentais para a manutenção do padrão nacional da candela, a unidade da intensidade luminosa e o desenvolvimento dos padrões metrológicos nacionais de fotometria, como os demais laboratórios primários da respectivas unidades de base, do IPQ. No âmbito da norma NP EN ISO/IEC 17025 [13], o Laboratório de Fotometria do IPQ efetua calibrações de lâmpadas em intensidade luminosa e de luxímetros, em iluminância [14].

### **4.1 Medições em Fotometria no LFR**

Segundo a norma NP EN IEC/ISO 17025 [13], existe um conjunto de fatores que determinam a exatidão e fiabilidade dos ensaios realizados pelo laboratório. Dentro desses fatores, destacam-se os seguintes [13]:

- Fatores humanos;
- Instalações e condições ambientais;
- Equipamentos;
- Meios experimentais;
- Métodos de ensaios, calibração e validação dos métodos.

Todos estes fatores acima mencionados possuem uma forte contribuição para a incerteza total da medição. O LFR é periodicamente submetido a auditorias internas seguindo a norma NP EN IEC/ISO 17025 [13]. O ponto principal destas auditorias é evidenciar a rastreabilidade metrológica das medições efetuadas pelo laboratório.

#### **4.1.1 Fatores Humanos**

A gestão do LFR garante a competência de todos os que trabalham com os equipamentos específicos e realizam ensaios/calibrações segundo a norma NP EN ISO/IEC 17025. Para efetuar ensaios/calibrações, têm que ser possuídos conhecimentos relevantes sobre a tecnologia utilizada no fabrico dos itens e o seu respetivo uso, assim como os defeitos ou degradações suscetíveis de ocorrer durante a sua utilização. Tem também que se ter um conhecimento dos requisitos gerais da legislação e normas em vigor [13].

### 4.1.2 Instalações e Condições de Trabalho

As instalações do LFR, onde se realizam as calibrações, garantem que as condições ambientais não invalidam os resultados ou não deterioram a qualidade exigida de qualquer medição.

O LFR monitoriza, controla e regista as condições ambientais exigidas nas especificações, métodos e procedimentos relevantes, ou quando as mesmas influenciam a qualidade dos resultados. No LFR, tem-se em conta as poeiras, as perturbações eletromagnéticas, as radiações, a humidade e temperatura ambientais. As calibrações são suspensas sempre que as condições ambientais possam comprometer os respetivos resultados. No LFR, existe uma separação efetiva entre área onde se efetua a calibração de lâmpadas e luxímetros e a área vizinha onde se realiza a aquisição de dados como os respetivos equipamentos. O acesso e utilização das áreas que afetam a qualidade das calibrações são controlados. São ainda tomadas medidas que garantem uma correta limpeza e arrumação do laboratório.

### 4.1.3 Equipamentos

Num espaço delimitado por uma cortina de cor preta, onde as paredes e o chão estão pintados de preto, com o objetivo de reduzir e controlar a luz parasita ao máximo, existe um banco fotométrico com 4 metros de comprimento. No banco fotométrico, existem perpendicularmente ao eixo, dois feixes laser modelo 31008 fabricados pela REO, apresentados na Figura 4.1, que materializam os planos de referência do filamento da lâmpada e da superfície sensível recetora do fotómetro. A perpendicularidade destes dois planos em relação ao eixo do banco fotométrico é inferior a 30' em ângulo.

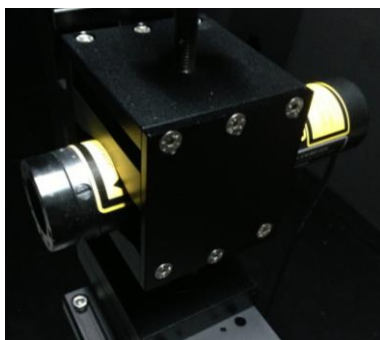


Figura 4.1 - Laser modelo 31008 fabricados pela REO

Para fazer coincidir os planos de referência da superfície recetora do fotómetro e do filamento da lâmpada respetivamente aos feixes laser, são utilizados suportes ajustáveis em altura, em translação longitudinal e transversal e em rotação à volta do eixo vertical e horizontal, apresentados na Figura 4.2.

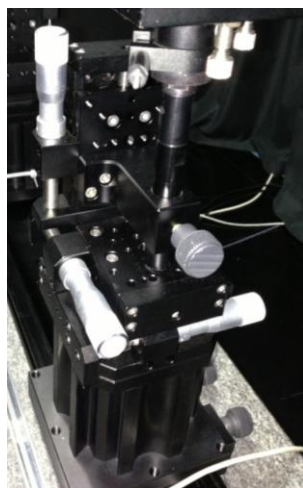


Figura 4.2 - Suportes ajustáveis

Para definir uma distância de medição de forma correta, existe um sistema de posicionamento nos suportes da lâmpada e do fotômetro amovível, colocados sobre leitores-codificadores digitais solidários ao banco fotométrico, como se pode ver na Figura 4.3.



Figura 4.3 - Leitores/codificadores digitais

#### 4.1.4 Meios Experimentais no Laboratório de Fotometria

Os meios experimentais existentes no LFR podem ser divididos em 4 classes:

- Fotométrica - Lâmpadas padrão de medição; fotômetros padrão de medição; padrões de medição secundários e de trabalho;
- Elétrica- Resistência; voltímetros;
- Dimensional - Instrumentos de medição de distância e de ângulo;
- Ambiental - Instrumentos de medição e de controlo de temperatura e de humidade relativa.

No IPQ, existem os laboratórios primários das grandezas elétricas, do comprimento e da temperatura. Todos os instrumentos de medição do laboratório de fotometria são calibrados no laboratório do

respetivo domínio metrológico. No domínio da fotometria, todos os resultados de medição têm rastreabilidade metrológica ao SI através dos padrões nacionais do Laboratório Primário de Fotometria de França [1].

#### 4.1.4.1 Fotométricos

As lâmpadas de padrão primário do LFR do modelo Wi 41 G fabricadas pela *Osram* e LIS 175-325 da *Polaron*, são apresentadas na Figura 4.4. A intensidade luminosa das lâmpadas padrão do laboratório é determinada ou por calibração no Laboratório Primário de Fotometria em França ou através da participação do laboratório em comparações EURAMET em intensidade luminosa [1].

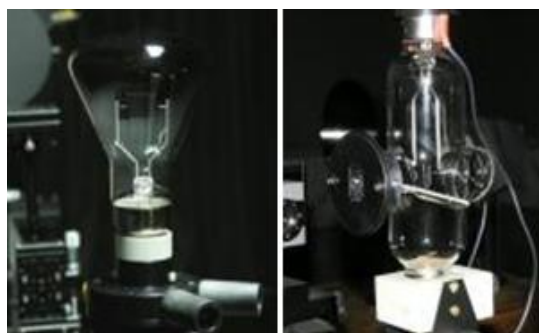


Figura 4.4 - Wi 41 G e LIS 175-325

O fotômetro padrão do modelo P 15 F0T da LMT, apresentado na Figura 4.5, está calibrado no Laboratório Primário de Fotometria do BNN-LNE [1].



Figura 4.5 - Fotômetro padrão P 15 F0T da LMT

O laboratório possui lâmpadas secundárias, como as apresentadas na Figura 4.6. Trata-se de lâmpadas BRL 6332, EHJ 6334 e FLJ 6315 da Oriel com potências na ordem de 50 W, 250 W e 1000 W, respectivamente. As lâmpadas de trabalho são envelhecidas de modo a encontrar as condições de alimentação das lâmpadas para que emitam na temperatura de cor pretendida definida pela CIE [1].





Figura 4.6 - Lâmpadas secundárias do laboratório, da esquerda para a direita: a) 50 W, b) 250 W e c) 1000W.

#### 4.1.4.2 Elétricos

Uma fonte de alimentação de corrente elétrica contínua da marca Bouhnik, presente na Figura 4.7, tem as condições de trabalho em corrente e em tensão elétricas de 30 A – 50 V, 10 A – 120 V e 6 A – 220 V. A fonte de alimentação tem uma estabilidade de 10 ppm [1].



Figura 4.7 - Fonte de alimentação Bouhnik

Uma resistência padrão, da marca *Bouhnik*, com a condição de trabalho em corrente e em tensão elétrica iguais a 30 A – 1 V, é estabilizada em temperatura com um coeficiente de 10 ppm.

Dois multímetros da *Agilent* modelo 34401A de 6½ dígitos, apresentados na Figura 4.8, são utilizados para a leitura da tensão elétrica nos terminais da lâmpada, para a leitura da tensão da fonte de alimentação da lâmpada e eventualmente para a leitura da tensão da fonte de alimentação.



Figura 4.8 - Multímetros da Agilent modelo 34401A

#### 4.1.4.3 Dimensional

Um banco ótico com 4 metros de comprimento, em que a leitura das distâncias se efetua com um codificador digital da *RSF Elektronik*, possui uma “exatidão”, segundo o fabricante, de  $\pm 5 \mu\text{m}$  e a interface como o utilizador é apresentado na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Interface com o utilizador do codificador digital *RSF Elektronik*

#### 4.1.4.4 Ambiental

O controlo ambiental no LFR é garantido por um sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) que permite temperaturas controladas entre 20 °C e 22 °C e humidades relativas entre 35 % e 65 %. Estas condições são ainda controladas por Termo-higrómetro modelo 1620 da *Hart Scientific*, apresentado na Figura 4.10, com resolução 0,01 °C e 1 % para a humidade relativa.



Figura 4.10 - Hart Scientific modelo 1620

#### 4.1.5 Ferramentas informáticas

Os programas de aquisição e tratamento de dados, escritos em linguagem LabVIEW, permitem medir grandezas como a tensão elétrica nos terminais da resistência para deduzir a corrente elétrica de alimentação em energia elétrica, a tensão elétrica nos terminais das lâmpadas, a fotocorrente (no caso do fotómetro) ou o sinal proveniente de um luxímetro, a temperatura e humidade ambientes.

### 4.2 Procedimento Experimentai

#### 4.2.1 Preparação prévia

A receção de qualquer instrumento de medição para calibração no LFR é registada no livro de ocorrências do laboratório. Na receção do instrumento de medição é efetuada uma inspeção visual minuciosa de modo a garantir que não haja anomalias relativamente às condições normais ou especificadas que possam impedir a realização das medições. O LFR possui instalações onde são armazenados os itens a calibrar durante o seu armazenamento de modo a proteger a integridade dos mesmos.

A fonte de alimentação da lâmpada deve ser posta em *stand by* e os multímetros devem ser ligados pelo menos 1 hora antes do início das medições, para garantir que se encontram em condições de funcionamento estáveis. O fotómetro padrão ou o luxímetro devem estar alimentados em energia pelo menos 15 minutos antes da sua utilização.

O fotómetro padrão, ou o luxímetro, é alinhado para que o seu plano de referência coincida com o plano de referência do filamento materializado. A lâmpada é também alinhada para fazer coincidir o plano do seu filamento com o plano de referência do filamento materializado. Na Figura 4.10, encontra-se o esquema de montagem do sistema de medição de grandezas fotométricas [15].

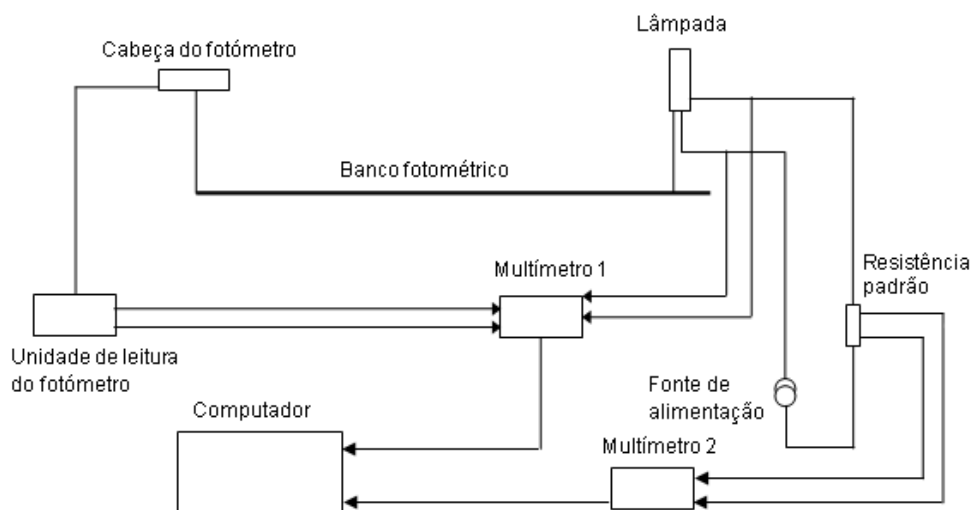


Figura 4.11 - Esquema de montagem do sistema de medição para a calibração de lâmpadas/luxímetros

## 4.2.2 Calibração de lâmpadas

O método consiste em comparar a radiação emitida pela lâmpada a calibrar com a emitida nas mesmas condições geométricas por uma lâmpada padrão primário do LFR, utilizando como sensor o fotômetro padrão primário do laboratório. Esta operação é efetuada, no mínimo, com duas lâmpadas de padrão primário diferentes [15].

### 4.2.2.1 Metodologia de medição

Consiste na sequência de medições:

- Medição da tensão  $U_L$ ,  $U_R$
- Medição da tensão devido à fotocorrente produzida pelo fotômetro padrão,  $U_{F,1}$ , com o orifício destapado
- Medição da tensão devido à fotocorrente produzida pelo fotômetro padrão,  $U_{F0,1}$ , com o orifício tapado
- Medição da tensão devido à fotocorrente produzida pelo fotômetro padrão,  $U_{F,2}$ , com o orifício destapado
- Medição da tensão devido à fotocorrente produzida pelo fotômetro padrão,  $U_{F0,2}$ , com o orifício tapado
- Medição da tensão devido à fotocorrente produzida pelo fotômetro padrão,  $U_{F,3}$ , com o orifício destapado
- Medição da tensão  $U_L$ ,  $U_R$

$U_R$  é a tensão elétrica nos terminais da resistência elétrica padrão. Divido pelo valor da resistência elétrica  $R$ , este valor permite conhecer e impor o valor da corrente elétrica de alimentação da lâmpada,

que faz parte das condições de funcionamento da lâmpada, segundo o respectivo certificado de calibração.

$U_L$  é o valor da tensão elétrica nos terminais da lâmpada. Trata-se de um parâmetro de controlo do bom funcionamento da lâmpada.

#### 4.2.2.2 Modelo da medição

Definindo o fator de sensibilidade dum fotodetector,  $s_v$ , como o quociente entre a iluminância a que é exposto o fotodetector,  $E_v$ , pela fotocorrente produzida pelo fotodetector,  $j_v$ :

$$s_v = \frac{j_v}{E_v} \quad \text{Equação 4.1}$$

A lei de Bouguer-Lambert, para uma dada distância,  $D$ , entre as lâmpadas e o fotodetector, afirma a proporcionalidade entre a intensidade luminosa,  $I_v$ , e o quadrado da distância, o fator de proporcionalidade sendo definido como a iluminância:

$$E_v = \frac{I_v}{D^2} \quad \text{Equação 4.2}$$

Portanto, para uma mesma distância de duas lâmpadas, de intensidade luminosa  $I_{v,S}$  e  $I_{v,P}$ , com um mesmo detetor, cuja fotocorrente é convertida em tensão elétrica,  $V_{f,S}$  e  $V_{f,P}$ , respetivamente, temos a relação:

$$I_S = I_P \frac{V_{f,S}}{V_{f,P}} \quad \text{Equação 4.3}$$

A partir de:

$$I_P = I_R (1 - \alpha \Delta t - h w(\emptyset) - k w(\theta)) \left( \frac{c_m \cdot U_{R,P}}{J_R \cdot R_{padr\tilde{a}o}} \right)^m \quad \text{Equação 4.4}$$

Tem-se o modelo de medição:

$$I_S = I_R \frac{V_{f,S}}{V_{f,P} (1 - \alpha \Delta t - h \cdot w(\emptyset) - k w(\theta)) \left( \frac{c_m \cdot U_{R,P}}{J_R \cdot R_{padr\tilde{a}o}} \right)^{m_l}} \quad \text{Equação 4.5}$$

Em que:

- $I_S$  - Grandeza de saída, intensidade luminosa da lâmpada a calibrar
- $I_P$  - Intensidade luminosa da lâmpada padrão primário

- $I_R$  - Intensidade luminosa da lâmpada padrão primário fornecida pelo respectivo certificado de calibração
- $V_{f,S}$  - Média das tensões elétricas devido à fotocorrente produzida pelo fotômetro com o orifício aberto, menos a média das tensões elétricas nos terminais da lâmpada com o orifício fechado para a lâmpada a calibrar
- $V_{f,P}$  - Média das tensões elétricas devido à fotocorrente produzida pelo fotômetro com o orifício aberto, menos a média das tensões elétricas nos terminais da lâmpada com o orifício fechado para a lâmpada padrão
- $\alpha\Delta t$  - Correção devido ao tempo de utilização da lâmpada padrão primário
- $hw(\emptyset)$  - Erro de alinhamento em torno do eixo vertical e perpendicular ao do banco fotométrico
- $kw(\theta)$  - Erro de alinhamento em torno do eixo horizontal e perpendicular ao do banco fotométrico
- $c_m$  - Fator de calibração do multímetro, dado pelo respectivo certificado de calibração
- $U_{R,P}$  - Valor médio da tensão elétrica nos terminais da resistência padrão da lâmpada padrão primário
- $J_R$  - Corrente elétrica da lâmpada padrão primário, dada pelo respectivo certificado de calibração
- $R_{padrão}$  - Valor da resistência elétrica padrão, dada pelo seu certificado de calibração
- $m_l$  - Expoente da variação relativa da intensidade luminosa de lâmpadas de incandescência com a variação relativa da intensidade da corrente elétrica da alimentação

Os ensaios consistem em sequências de medições para lâmpada de padrão primário e para a lâmpada a calibrar. Este procedimento é realizado pelo menos duas vezes, usando duas lâmpadas padrão primário diferentes [15].

A lei de Bouguer-Lambert só é válida quando a distância entre a fonte luminosa e o detetor,  $D$ , é grande em comparação ao tamanho do elemento radiativo ou o diâmetro da superfície recetora,  $d$ . Admite-se que a validade é cumprida quando  $D$  é maior que aproximadamente 20 vezes  $d$ , o que, na prática se verifica quando  $D \geq 1$  m [16].

#### 4.2.2.3 Cálculo das incertezas

A incerteza de medição foi calculada de acordo com o documento “Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração (IPQ, 2ª Edição, Dezembro 2005)” [9]. Segundo este

documento, como as grandezas de entrada da Equação 4.5 não possuem correlação, a incerteza-padrão  $u(y)$  da grandeza de saída é dada pela Equação 4.6, que deriva da Equação 3.12.

$$u^2(y) = \sqrt{\sum_i c_i^2 u(x_i)^2} \quad \text{Equação 4.6}$$

Onde os termos  $c_i$  são os coeficientes de sensibilidade. As expressões dos coeficientes de sensibilidade são apresentadas a seguir.

- $c_1 = \frac{\partial(I_S)}{\partial(I_R)} = \frac{I_S}{I_R}$
- $c_2 = \frac{\partial(I_S)}{\partial(V_{f,S})} = \frac{I_S}{V_{f,S}}$
- $c_3 = \frac{\partial(I_S)}{\partial(V_{f,P})} = \frac{-I_S}{V_{f,P}}$
- $c_4 = c_5 = c_6 = \frac{\partial(I_S)}{\partial(\alpha\Delta t)} = \frac{-I_S}{(1-\alpha\Delta t-hw(\emptyset)-kw(\theta))}$
- $c_7 = \frac{\partial(I_S)}{\partial(c_m)} = \frac{m_I I_S}{c_m}$
- $c_8 = \frac{\partial(I_S)}{\partial(U_{R,P})} = \frac{m_I I_S}{U_{R,P}}$
- $c_9 = \frac{\partial(I_S)}{\partial(R_{padrão})} = \frac{-m_I I_S}{R_{padrão}}$
- $c_{10} = \frac{\partial(I_S)}{\partial(m_I)} = I_S \cdot \ln\left(\frac{c_m \cdot U_{R,P} \cdot R_{padrão}}{J_R}\right)$

O contributo para a incerteza-padrão  $u_i(y)$ , associada a estimativa de saída, é dada pelo produto da incerteza padrão associada à estimativa de entrada,  $u(x_i)$ , multiplicada por coeficiente de sensibilidade respetivo. A incertezas padrão associadas  $u(x_i)$  são estimadas segundo os métodos do tipo A e B, como apresentado no subcapítulo 3.3.

O número de graus de liberdade efetivo  $v_{ef}$  da incerteza padrão é calculado pela fórmula de *Welch-Satterthwaite*, Equação 3.14 do Capítulo 3.

A incerteza de medição expandida  $U$ , Equação 3.13, consiste no produto do valor obtido na incerteza combinada,  $u_c(y)$ , por um fator de expansão. O fator de expansão  $k$  é calculado pela aplicação do inverso da distribuição *t-Student*, para a probabilidade de rejeição igual a 0,0455 e para o número de graus de liberdade efetivo,  $v_{ef}$ , neste caso  $k = 2$ .

Pela aplicação da Equação 3.15, o resultado completo da medição consiste na estimativa  $y$  da mensuranda e na incerteza expandida associada  $U$ .

Como referido anteriormente, este procedimento é realizado pelo menos para duas lâmpadas de padrão primário diferentes. Deste modo, a intensidade resultante de 2 séries de medições, resulta da Equação 4.7.

$$I = \frac{I_{S1} + I_{S2}}{2} \quad \text{Equação 4.7}$$

E a incerteza padrão correspondente é dada por a Equação 4.8 seguinte.

$$u(I) = \sqrt{\frac{u(I_{S1})^2 + u(I_{S2})^2}{2}} \quad \text{Equação 4.8}$$

#### 4.2.2.4 Validação dos resultados dos ensaios experimentais

A validação dos resultados consiste na diferença entre o valor da intensidade luminosa  $I_S$  deduzido do valor da intensidade luminosa da lâmpada padrão primário. Um valor da diferença relativa inferior a 0,5 % é uma primeira validação do método.

#### 4.2.3 Calibração de luxímetros

O método consiste em comparar o valor da iluminância fornecido pelo luxímetro em calibração pelo valor referência deduzido da aplicação da lei do inverso do quadrado da distância, utilizando lâmpadas com valor conhecido de intensidade luminosa, lâmpadas de trabalho [17].

##### 4.2.3.1 Metodologia de medição

As calibrações dos luxímetros consistem em sequências de medições para cada um das 3 lâmpadas de trabalho, e para cada lâmpada 2 distâncias. Numa sequência de operações para cada lâmpada, a obtenção dos dados experimentais do ensaio consiste em:

- Medições das tensões  $U_R$  e  $U_L$ , como definidas no 4.3.2.1;
- Medição da iluminância  $E_{Lux,1}$  com o orifício destapado;
- Medição da iluminância  $E_{zero,1}$  com o orifício tapado;
- Medição da iluminância  $E_{Lux,2}$  com o orifício destapado;
- Medição da iluminância  $E_{zero,2}$  com o orifício tapado;
- Medição da iluminância  $E_{Lux,3}$  com o orifício destapado;
- Medições das tensões  $U_R$  e  $U_L$ , como definidas no 4.3.2.1;

Mudando o luxímetro para uma segunda distância, repete-se a sequência de medições.



#### 4.2.3.2 Modelo da medição

Pela lei de Bouguer, a iluminância do luxímetro é dada por:

$$E_{ref} = \frac{I_{ref}}{(d_{Lamp-luxí})^2} \quad \text{Equação 4.9}$$

Grandezas:

- $E_{ref}$  – Valor referência da iluminância
- $I_{ref}$  - Intensidade luminosa da lâmpada de trabalho, dada pelo seu certificado de calibração
- $d_{Lamp-luxí}$  - Distância entre o plano de referência do filamento da lâmpada e o plano de referência do luxímetro

A distância entre o plano de referência do filamento da lâmpada e o plano de referência do luxímetro em calibração tem que ser corrigida pela distância entre o plano de referência do luxímetro e o da origem das distâncias do luxímetro em calibração, como apresentado na Figura 4.12 seguinte [17].

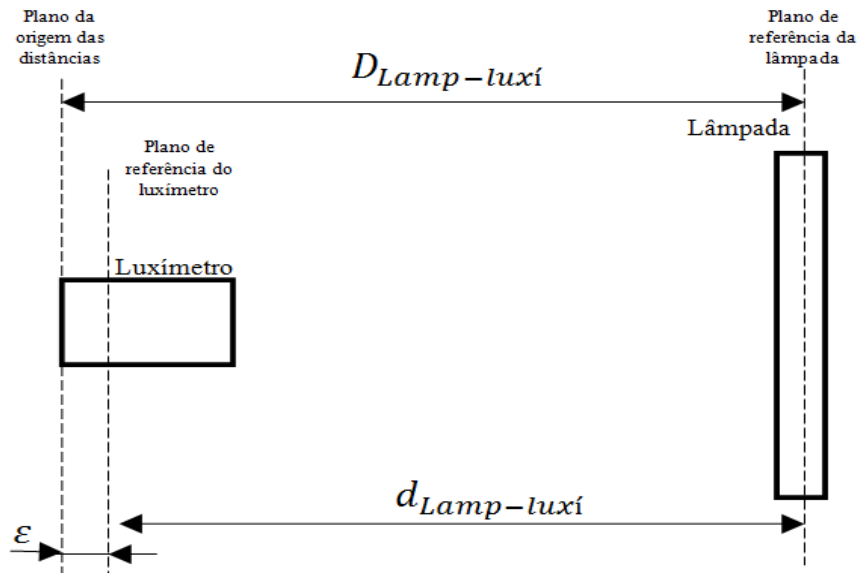


Figura 4.12 - Plano de referência do luxímetro

Deste modo, a distância entre o plano de referência do luxímetro e do plano de referência da lâmpada é dada pela Equação 4.10:

$$d_{Lamp-luxí} = (D_{Lamp-luxí}) + \varepsilon \quad \text{Equação 4.10}$$

Grandezas:

- $D_{Lamp-luxí}$  - Distância entre o plano de referência do filamento da lâmpada e o plano das distâncias do luxímetro
- $\varepsilon$  - Distância entre o plano de referência do luxímetro e o da origem das distâncias do luxímetro em calibração

A distância entre o plano de referência do luxímetro e o da origem das distâncias do luxímetro em calibração é deduzido dos valores de iluminância ( $E_1, E_2$ ) para as distâncias ( $D_1, D_2$ ), pela aplicação da Equação 4.11.

$$\varepsilon = \frac{D_1\sqrt{E_1} - D_2\sqrt{E_2}}{\sqrt{E_2} - \sqrt{E_1}} \quad \text{Equação 4.11}$$

O modelo da grandeza de saída é dado pela Equação 4.12:

$$e = E_{luxí} - E_{ref} = E_{luxí} - \frac{I_{ref}}{\left((D_{Lamp-luxí}) + \varepsilon\right)^2} \quad \text{Equação 4.12}$$

Grandezas:

- $e$  - Erro sobre a iluminância
- $E_{luxí}$  - Média das iluminâncias lidas no mostrador do luxímetro em calibração

Como as calibrações são efetuadas utilizando a lei do inverso do quadrado das distâncias é necessário que a distância entre a lâmpada e a superfície sensível do fotómetro padrão seja suficientemente grande para não introduzir erros associados ao filamento da lâmpada e da superfície sensível do fotómetro padrão. A distância de medição deve ser no mínimo igual a 20 vezes o diâmetro da superfície sensível do luxímetro em calibração [17].

#### 4.2.3.3 Cálculo da incerteza

A incerteza de medição foi calculada de acordo com o documento “Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração (IPQ, 2ª Edição, Dezembro 2005)” [9]. Como as grandezas de entrada da Equação 4.12 são independentes, a incerteza-padrão  $u(y)$  da grandeza de saída é dada pela Equação 3.12:

Onde os termos  $c_i$  são os coeficientes de sensibilidade. As expressões dos coeficientes de sensibilidade são:

- $c_1 = \frac{\partial(e)}{\partial(E_{luxi})} = 1$
- $c_2 = \frac{\partial(e)}{\partial(I_{ref})} = \frac{-1}{(d_{Lamp-luxi})^2}$
- $c_3 = \frac{\partial(e)}{\partial(D_{Lamp-luxi})} = c_4 = \frac{\partial(e)}{\partial(\varepsilon)} = \frac{-2 I_{ref}}{(d_{Lamp-luxi})^3}$

As calibrações dos luxímetros consistem em sequências de medições para cada um das 3 lâmpadas de trabalho, e para cada lâmpada 2 distâncias.

O contributo para a incerteza-padrão  $u_i(y)$ , associada a estimativa de saída, é dada pelo produto da incerteza padrão associada à estimativa de entrada,  $u(x_i)$ , multiplicada pelo coeficiente de sensibilidade respetivo.

O número de graus de liberdade efetivos  $v_{ef}$  da incerteza padrão é calculado pela fórmula de *Welch-Satterthwaite*, Equação 3.14 do Capítulo 3.

O fator de expansão  $k$  é calculado pela aplicação do inverso da distribuição *t-Student*, para a probabilidade de rejeição igual a 0,0455 e para o número de graus de liberdade efetivo,  $v_{ef}$ , neste caso  $k = 2$ .

#### 4.2.3.4 Validação dos resultados dos ensaios experimentais

A validação dos resultados consiste em comparar as ordens de grandezas das incertezas expandidas, associadas aos valores de referência de iluminância, com as das incertezas expandidas relativas de intensidade luminosa das lâmpadas de trabalho [17].



## 5 Projeto do Automatismo

O presente capítulo tem como principal objetivo o desenvolvimento de um automatismo para ser aplicado no LFR do IPQ com a função de automatizar o movimento de abertura/fecho de um orifício circular que permite ou interrompe a receção de luz proveniente de uma lâmpada por parte de um luxímetro/fotómetro.

Iniciou-se a realização deste automatismo com o seu enquadramento e com o dimensionamento do projeto, a partir de uma descrição dos principais requisitos do automatismo. A conceção do automatismo tem como objetivo apresentar a solução encontrada para se implementar no LFR, com uma definição completa de todos os componentes utilizados no automatismo de modo a justificar e a viabilizar a solução encontrada.

### 5.1 Enquadramento do Automatismo

Este mecanismo tem a função de automatizar o movimento de abertura/fecho de um orifício circular que, antes deste trabalho era efetuado manualmente por um/a operador/a como ilustrado na Figura 5.1.

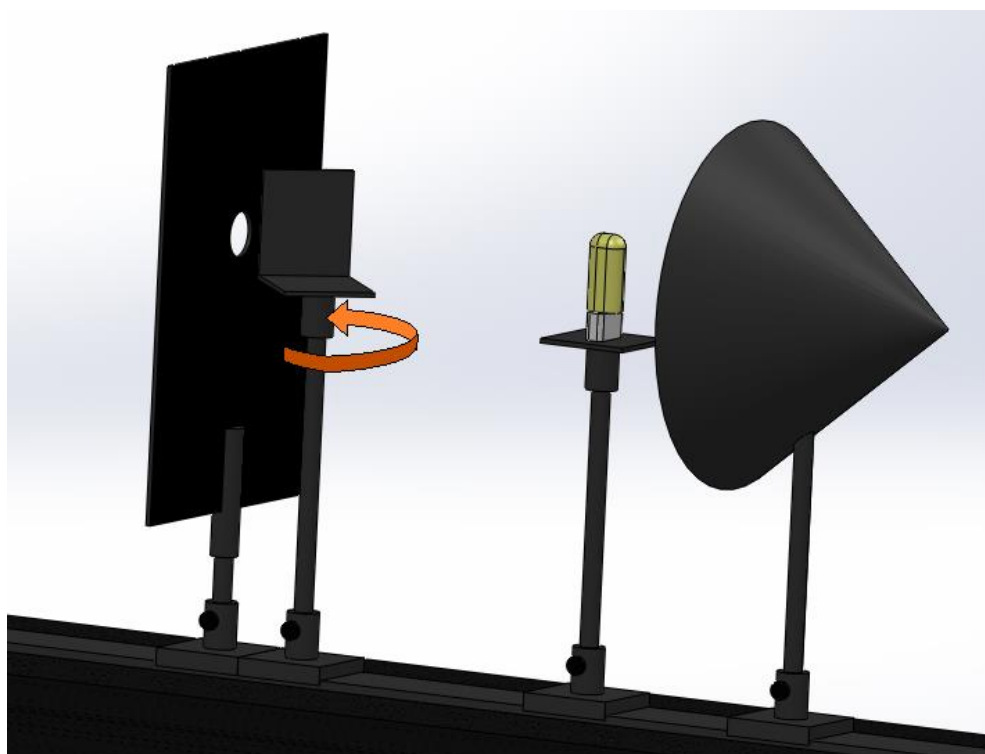


Figura 5.1 - Sistema manual atual

## 5.2 Conceção do Automatismo

Todo o desenvolvimento do automatismo foi realizado com base na identificação das limitações, das especificações funcionais, das tecnologias e materiais adequados à sua utilização e dos custos de projeto.

Um sistema autónomo é constituído fundamentalmente por dois subsistemas [18]:

- Processo: sistema de produção, que executa os objetivos do sistema automático, através de equipamentos dedicados devidamente acionados e controlados;
- Automatismo: sistema de controlo, que recebe informações e fornece ordens de comando ou ações de regulação aos manobreadores que alimentam os atuadores do processo.

Na Figura 5.2 pode ver-se as fases de um automatismo.

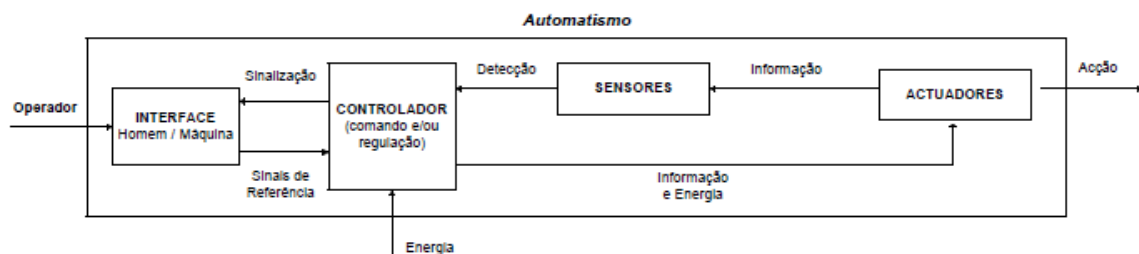


Figura 5.2 - Estrutura de um sistema automático. (adaptado de [18])

### 5.2.1 Requisitos do automatismo

Um dos requisitos para a construção do automatismo é a utilização do LabVIEW num computador remoto associado para o seu controlo, uma vez que é o programa informático que atualmente efetua a recolha de dados no processo de calibração de lâmpadas e luxímetros onde este automatismo vai ser aplicado. Deste modo, a componente mecânica do sistema tem que poder ser controlada com recurso à linguagem de programação LabVIEW. Outros requisitos também a ter em conta são ter dimensões adequadas para ser aplicado no banco fotométrico que se encontra no LFR, e ter a capacidade de suportar temperaturas relativamente elevadas devido a proximidade de uma fonte de calor (lâmpada).

### 5.2.2 Especificações funcionais

Para este projeto, optou-se por uma estratégia para a conceção do automatismo focada principalmente na simplicidade do mecanismo. Consideraram-se apenas os propósitos básicos do sistema, com vista a reduzir ao máximo todos os seus movimentos e economizar no uso de todos os recursos. Para obter esta simplicidade, restringiu-se o movimento de uma placa circular a um movimento de translação segundo o eixo dos YY ou translação segundo o eixo dos XX, ou ainda movimento rotacional segundo

o eixo dos ZZ. Assim, após uma breve análise das hipóteses para o seu dimensionamento, chegou-se a um conjunto de soluções, ilustradas na Figura 5.3. Com base na simplicidade de funcionamento, construção e custo da produção, averiguou-se a solução adequada. Teve-se também em conta a facilidade de intervenção para a inicialização do sistema, reconfiguração, a facilidade de inspeção para controlo da qualidade do funcionamento, manutenção, entre outros.

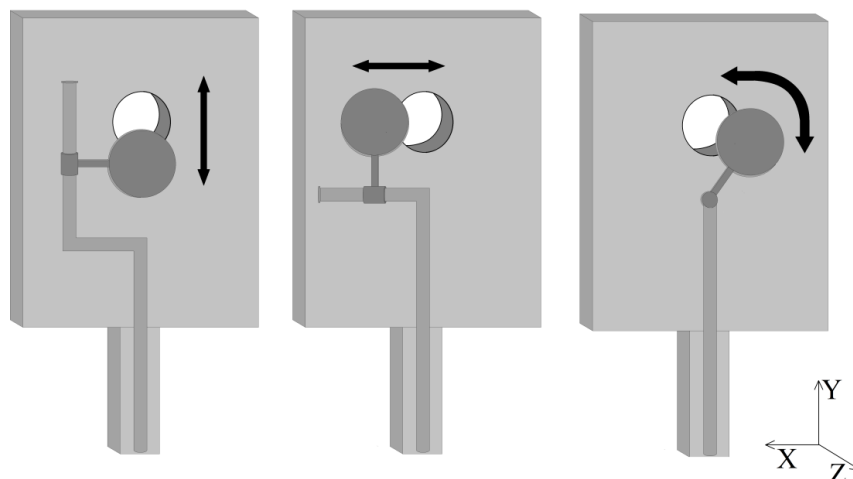


Figura 5.3 - Soluções possíveis: a) translação vertical; b) translação horizontal; c) rotação

Para a escolha da solução mais adequada para se adaptar a este projeto, começou-se por separar os 3 tipos de movimento para o obturador: por translação vertical, ou por translação horizontal ou por rotação. De modo simplificado, para as duas primeiras soluções, seria mais recomendável aplicar um sistema mecânico com um movimento linear. Para a última solução, seria necessário aplicar um sistema mecânico que proporcione um movimento angular. De modo a ter a solução mais simples possível, com o menor número de componentes e acessórios, optou-se pela última solução.

### 5.2.3 Especificações tecnológicas

Após a decisão de se optar por um automatismo com movimento angular, analisaram-se os equipamentos mecânicos que possibilitam o movimento do automatismo, e o componente eletrónico que permite o controlo destes equipamentos mecânicos.

#### 5.2.3.1 Equipamento Mecânico

Estes tipos de equipamentos mecânicos aplicados a projetos de automação são denominados atuadores. Dentro da automação industrial, os 3 tipos de atuadores mais utilizados são os atuadores pneumáticos, hidráulicos e elétricos [19]. Na Tabela 3, encontram-se algumas vantagens e desvantagens para cada um destes tipos de atuadores.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens de atuadores

Atuadores			
	Pneumáticos	Hidráulicos	Elétricos
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Baixo custo de aquisição</li> <li>-Elevada velocidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Potência elevada em relação às suas dimensões</li> <li>-Velocidades moderadas</li> <li>-Bom controlo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Controlo preciso, confiável e fácil</li> <li>-É possível a sua aplicação a técnicas de controlo sofisticadas ao movimento</li> <li>-Custo de aquisição acessível</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-A compressibilidade do ar limita o controlo e a precisão</li> <li>-Necessidade de válvulas</li> <li>-Poluição sonora</li> <li>-Dimensões</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Elevado custo de aquisição</li> <li>-Problemas de manutenção</li> <li>-Dimensões</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-São essencialmente unidades com elevada velocidade e baixo torque, resultando por isso na necessidade de engrenagens</li> </ul>

Após a análise da Tabela 3, torna-se evidente que os atuadores elétricos são os mais adequados para a aplicação no automatismo, uma vez que este mecanismo vai estar num laboratório aplicado num banco de ensaio. Algumas desvantagens encontradas nos atuadores pneumáticos e hidráulicos são incompatíveis com a sua aplicação.

### 5.2.3.2 Placa de controlo

A placa de controlo possui um interesse particular, uma vez que o atuador elétrico selecionado para o automatismo terá que ser acionado a partir deste tipo de dispositivo, onde será introduzido um programa de controlo de posição angular em linguagem LabVIEW.

Para uma melhor noção do que é uma placa de controlo, pode-se fazer uma comparação entre uma placa de controlo e um computador, uma vez que ambos possuem um elevado número de características em comum. Enquanto um computador tem uma função mais geral, que permite executar um vasto de número de programas, uma placa de controlo tem um propósito mais específico, como por exemplo, controlar atuadores elétricos.

Uma placa de controlo consiste num circuito integrado, digital, implementado num único chip, que contém um processador e um conjunto de periféricos, de utilidade típica em atividades de controlo eletrónico, já embutidos no mesmo chip, como por exemplo: memória *flash*, memória *RAM*, UART, timer, *PWM*, conversor analógico-digital, entre outros [20].



## 6 Escolha dos Componentes

Para a produção do automatismo é pretendido que este seja composto pelo menor número possível de componentes. Deste modo, caso seja necessário efetuar algum ajuste, de forma a facilitar a sua calibração, tanto para o atuador elétrico como para a placa de controlo, há o menor número de parâmetros ajustáveis. Não esquecendo que automatismo, e os seus componentes, têm que ter a capacidade de oferecer um desempenho aceitável no acionamento mecânico, de modo a garantir com precisão a posição angular no controlo de passagem de luz no banco fotométrico do LFR. Como consequência, uma solução de compromisso foi procurada tendo em conta ainda o fator económico.

### 6.1 Matriz de Decisão

Decidir é o ato de selecionar uma linha de ação preferida entre várias alternativas existentes.

Em engenharia, o processo de avaliação de soluções é uma etapa essencial de procedimento de projeto, onde não existe nenhuma regra ou padrão de aplicação geral que permita uma decisão acertada.

Existem diversos instrumentos que podem contribuir para a tomada de decisões, dependentes do ambiente cultural e organizacional e das situações envolvidas, e mais ou menos polarizados por suportes racionais, como modelos matemáticos, por meios computacionais ou por questões e conhecimentos de psicologia [21].

Deste modo, recorrer-se-á a uma ferramenta, baseada na matriz de decisão, que auxilia a tomada de decisão entre o atuador mais adequado para aplicar no automatismo.

A matriz de decisão, que armazena informação extremamente relevante para a avaliação face às alternativas, é utilizada frequentemente em processos de engenharia. Esta informação é armazenada numa matriz/tabela. Embora este tipo de procedimento seja aparentemente simples e objetivo, deve ter-se em conta que a análise pode ser tanto subjetiva como mais pormenorizada [22]. Esta é uma das desvantagens da utilização deste tipo de ferramenta, uma vez que esta subjetividade depende diretamente de uma “opinião” que está, por sua vez, diretamente ligada ao conhecimento de todos os pormenores de uma determinada solução. Para obter resultados com o máximo de rigor e confiabilidade, efetuou-se um breve estudo na área dos atuadores elétricos, em particular os motores de passo e servomotores, e de placas de controlo de modo a compreender as vantagens e desvantagens da aplicação dos mesmos neste projeto de automação.

A informação retirar da Matriz de decisão final corresponde à soma da multiplicação das notas atribuídas a cada critério de avaliação, classificação simples, pelos respetivos fatores de ponderação. As notas atribuídas a cada critério de avaliação, assim como a distribuição dos fatores de ponderação,

foram determinadas após uma análise dos componentes em estudo. Embora as notas, e a distribuição dos fatores de ponderação, possuam alguma subjetividade, procurou-se o máximo rigor possível.

A Tabela 4 apresenta a correspondência entre uma hierarquização qualitativa e índices quantitativos, esta correspondência é denominada classificação simples. Consoante uma análise do critério de avaliação é atribuída uma nota quantitativa.

Tabela 4 - Classificação simples.

Qualificação	Índice quantitativo
Muito Bom	[6;9]
Bom	[3;6]
Insatisfatório	[0;3]

### 6.1.1 Atuador elétrico

Para se efetuar a escolha do atuador elétrico teve-se como objetivo escolher aquele que melhor se adapta ao projeto em questão. Atualmente existe, no mercado, um vasto leque de atuadores elétricos disponíveis. Os atuadores elétricos mais comuns são os motores de corrente contínua (1), motores de passo (2) e servomotores (3). Apesar de todos estes atuadores possuírem em comum motores elétricos, cada um tem uma área de aplicação diferente e método de funcionamento diferente. [23]



Figura 6.1 - Atuadores elétricos [23]

Uma vez que um motor de corrente contínua carece de precisão posicional e está mais vocacionado para aplicações que requerem velocidade, deixa de ter sentido a sua utilização como atuador elétrico para o automatismo a aplicar no LFR. Ao contrário, os motores de passo e os servomotores são dotados de uma elevada precisão posicional. Segundo um estudo comparativo entre um motor de passo e um servomotor, conclui-se que para processos industriais que exigem, além de uma precisão no posicionamento, um controlo bem desenvolvido de torque e velocidade, um servomotor apresenta-se como melhor alternativa [24]. Para a escolha do atuador, teve-se em conta, tal como no estudo mencionado, uma análise das diferenças entre os dois tipos de atuadores e a aplicação da Matriz de decisão.

Na Tabela 5, é apresentada uma relação entre os critérios de avaliação tidos em conta na escolha do atuador, as notas atribuídas aos critérios relativamente à sua importância na aplicação no automatismo, e a justificação para a atribuição da respetiva nota. De notar, que as notas atribuídas a cada critério são subjetivas e dependentes do autor da Matriz de Decisão. Posteriormente, é elaborada a árvore modelo, Figura 6.2, e em seguida a árvore de objetivos, Figura 6.3, com as respetivas ponderações. Na Tabela 6 encontra-se a matriz de decisão aplicada para a escolha do atuador elétrico.

Tabela 5 - Classificação simples e justificação.

<b>Critério de avaliação</b>	<b>Motor de Passo</b>	<b>Servomotor</b>	<b>Justificação</b>
<b><i>Plug and Play</i></b>	7	7	Ambos os atuadores são de fácil preparação e utilização.
<b>Sensor acoplado</b>	0	9	Um motor de passo necessita de um sensor externo para confirmar a sua posição, por outro lado um servomotor possui um sensor acoplado.
<b>Eficiência energética</b>	4	6	Contrariamente a um motor de passo, um servomotor tem a capacidade de fornecer potência proporcional à carga mecânica aplicada.
<b>Precisão</b>	8	7	Ambos têm a capacidade de ser bastante precisos, no entanto o motor de passo tem uma ligeira vantagem.
<b>Velocidade</b>	7	5	A velocidade de posicionamento de um motor de passo é superior à de um servomotor.
<b>Tipo de carregamento suportado</b>	2	6	Um motor de passo não consegue lidar com alterações com variações do carregamento a que está sujeito.
<b>Custo de aquisição</b>	7	6	Preço de mercado equivalente, mas com ligeira vantagem para um motor de passo.
<b>Manutenção/durabilidade</b>	9	5	Uma vez que um motor de passo tem menos componentes que um servomotor, tem uma manutenção inferior.

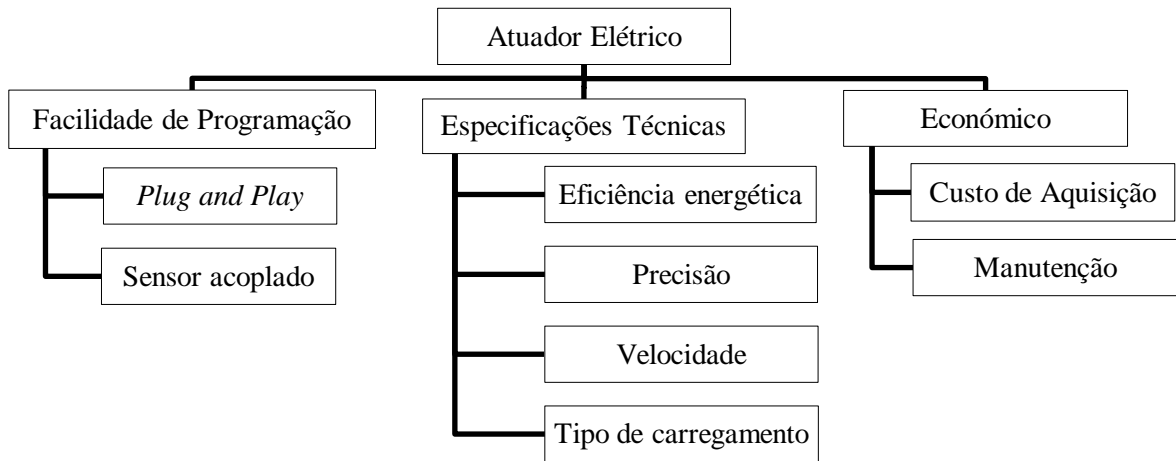


Figura 6.2 - Árvore modelo aplicada à escolha do atuador elétrico

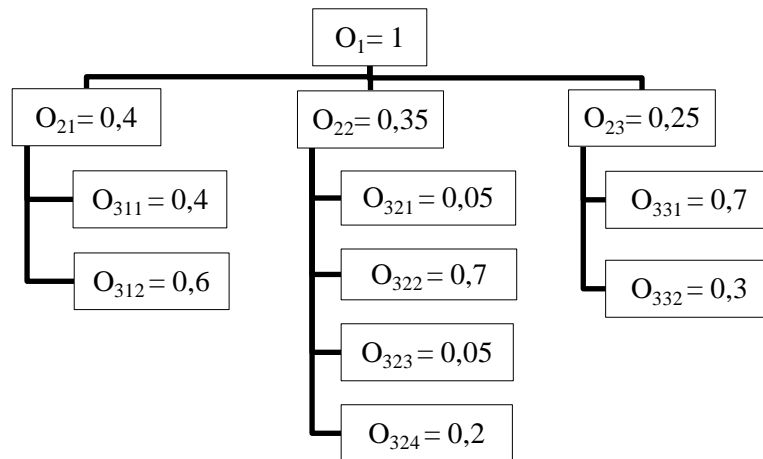


Figura 6.3 - Árvore de objetivos aplicada à escolha do atuador elétrico

Fatores de ponderação:

- $Plug\ and\ Play = O_{311} = 1 \times 0,4 \times 0,4 = 0,16$
- $Sensor\ acoplado = O_{312} = 1 \times 0,4 \times 0,6 = 0,24$
- $Eficiência\ energética = O_{321} = 1 \times 0,35 \times 0,05 = 0,0175$
- $Precisão = O_{322} = 1 \times 0,35 \times 0,7 = 0,245$
- $Velocidade = O_{323} = 1 \times 0,35 \times 0,05 = 0,0175$
- $Tipo\ de\ carregamento = O_{324} = 1 \times 0,35 \times 0,2 = 0,07$
- $Custo\ de\ aquisição = O_{331} = 1 \times 0,25 \times 0,7 = 0,175$
- $Manutenção = O_{332} = 1 \times 0,25 \times 0,3 = 0,075$

Tabela 6 - Matriz de decisão aplicado à escolha do atuador elétrico

Critério	Motor de passo		Servomotor		
	Fator de ponderação	Classificação simples	Classificação ponderada	Classificação simples	Classificação ponderada
<i>Plug and Play</i>	0,16	7	1,12	7	1,12
Sensor de posição acoplado	0,24	0	0	9	2,16
Eficiência energética	0,0175	2	0,035	7	0,1225
Precisão	0,245	8	1,96	7	1,715
Velocidade	0,0175	7	0,1225	5	0,0875
Tipo de carregamentos	0,07	2	0,14	6	0,42
Custo de Aquisição	0,175	7	1,225	6	1,05
Manutenção	0,075	9	0,675	4	0,3
Soma			5,2775	Soma	6,975

Após a análise da matriz de decisão, critérios como a facilidade de montagem e inicialização da placa de controlo (*Plug and Play*), possuir um sensor de posição acoplado, a precisão e custo de aquisição, tiveram um peso fundamental no resultado final. Concluiu-se que a escolha mais adequada é um atuador elétrico do tipo servomotor, uma vez que teve uma classificação ponderada de 6,9750 contra a pontuação inferior do motor de passo 5,2775.

### 6.1.2 Servomotor

Após a escolha do servomotor como atuador elétrico a ser aplicado no automatismo, para uma boa escolha, é essencial compreender o seu modo de funcionamento.

Na década de oitenta do século passado, os servomotores eram maioritariamente motores de corrente contínua uma vez que, devido à sua corrente elétrica de elevada intensidade, apenas conseguiam ser controlados por retificadores de controlo em silício, sendo estes servomotores utilizados especificamente em sistemas do tipo servo amplificadores. Quando começaram a ser comercializados transístores capazes de controlar e alterar este tipo de correntes a elevadas frequências, a utilização de servomotores de corrente alternada tornou-se comum [25]. Um servomotor é um dispositivo de dimensões reduzidas que possui um eixo que tem a capacidade de assumir uma posição angular com um elevado grau de precisão. Os servomotores têm por base construtiva os motores síncronos comuns.

Uma grande vantagem dos servomotores é o facto de estes serem constituídos por motores elétricos pequenos e de possuírem um circuito eletrónico de controlo e um potenciómetro já incorporado. Uma outra vantagem deste tipo dispositivo mecânico é a capacidade de fornecer potência proporcional à carga mecânica aplicada, deste modo um servomotor que, por circunstâncias da sua função, necessite de potência reduzida tem um consumo energético também reduzido. Os servomotores são extremamente úteis em mecanismos de automação devido à sua grande área de aplicação. Podem ser encontrados nos dispositivos de reprodução de gravação de DVD e CD, câmaras móveis de segurança, sistemas de posicionamento de antenas e radares, robôs industriais, máquinas de precisão, lentes motorizadas, válvulas motorizadas de controlo [26] .

Um servomotor é composto por um conjunto de dispositivos principais, o motor, um conjunto de engrenagens, o circuito de controlo e um potenciómetro, Figura 6.4 seguinte.

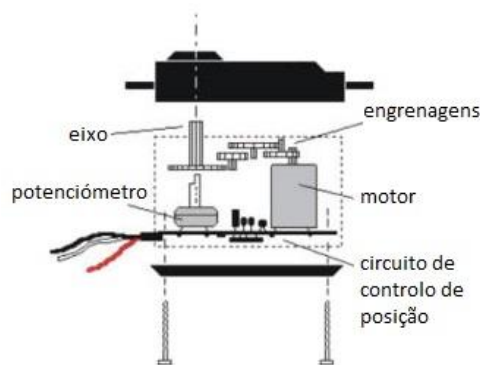


Figura 6.4 - Constituintes de um servomotor

O princípio de funcionamento de um servomotor encontra-se descrito abaixo:

- Circuito de controlo de posição - Recebe o sinal e energia do recetor e monitoriza a posição do potenciómetro. Deste modo, com o sinal do recetor e a posição do potenciómetro controla a posição angular final do eixo. Ao tentar-se rodar o eixo do servomotor, o circuito de controlo deteta uma diferença entre o valor do potenciómetro e a amplitude dos impulsos e ativa o motor para a tentar corrigir. Este processo é tão rápido que apenas se sente o servomotor a resistir à tentativa de alterar a sua posição de rotação;
- Potenciómetro - Conectado diretamente ao eixo, consiste em uma resistência variável rotativa, funciona como um sensor de posição e monitoriza a posição angular do eixo do servomotor;
- Motor - Fornece potência mecânica a um conjunto de engrenagens, e por consequente, ao eixo;
- Engrenagens - Reduzem a rotação do motor e transferem mais binário ao eixo final.

O ângulo é determinado pela duração (largura) do sinal *PWM* (modulação de largura de impulso) enviado ao servomotor. Este sinal pode ter uma amplitude de 0 V volt ou 5 V. O circuito de controlo

do servomotor analisa este sinal normalmente com intervalos de 20 ms. Se dentro deste intervalo receber um sinal com a duração de 0,6 ms rodará até atingir o limite do intervalo de rotação correspondente, neste caso 0°. Se receber impulsos de 2,4 ms rodará até atingir o outro limite do intervalo de rotação, correspondente a 180° [27].

#### 6.1.2.1 Matriz de decisão aplicada à escolha do servomotor

A escolha do servomotor para ser implementado no automatismo teve como principal critério um compromisso entre precisão no controlo posicional e custo de aquisição. Após uma análise da oferta deste tipo de atuadores em Portugal, conclui-se que servomotores normalmente utilizados em pequenos mecanismos de robótica possuem um custo de aquisição mais atrativo em comparação com servomotores para máquinas industriais. Como tal, selecionou-se um conjunto de servomecanismos disponíveis em lojas de robótica, e pelo uso da matriz de decisão, escolheu-se o que melhor se adapta aos requisitos de projeto.

Na Tabela 7, são apresentados os elementos que correspondem aos critérios de avaliação a ter em conta na escolha do servomotor, onde estão reunidas informações acerca dos parâmetros essenciais para a comparação entre os servomotores selecionados para este estudo. Foram selecionados para este estudo 4 servomotores de um conjunto de lojas de robótica Portuguesas.

Tabela 7 - Critérios de avaliação servomotor

Elementos	<i>Parallax-Futaba S148</i>	<i>Power HD-1160A</i>	<i>Hitec HS-322HD</i>	<i>Pololu -High Torque Servo</i>
<b>Dimensões / mm</b>	40,5×20,0×38	28×13,2×29,6	40×20×36,5	41.3×20,3×38,7
<b>Massa / g</b>	43	17	43	56
<b>Velocidade / seg/60°</b>	0.22	0,11	0,19	0,16
<b>Torque / kg.cm</b>	3,0	2.7	3	10,2
<b>Interface com controlador</b>	Boa	Boa	Excelente	Boa
<b>Manutenção</b>	Boa	Boa	Boa	Boa
<b>Custo de aquisição / € (valores aproximados)</b>	13	9	13	16

Na Tabela 8 é apresentada a correspondência entre uma hierarquização qualitativa e índices/notas quantitativos, classificação simples.

Tabela 8 - Classificação simples

<b>Critério</b>	<i>Parallax-Futaba S148</i>	<i>PowerHD-1160A</i>	<i>Hitec HS-322HD</i>	<i>Pololu -High Torque Servo</i>
<b>Interface com o controlador</b>	4	4	8	3
<b>Dimensões</b>	5	9	5	6
<b>Massa</b>	5	8	5	4
<b>Velocidade</b>	7	4	6	5
<b>Torque</b>	6	4	6	8
<b>Custo de aquisição</b>	5	7	5	3
<b>Manutenção</b>	5	5	6	6

Na Figura 6.5 e Figura 6.6 encontra-se a árvore modelo e a árvore de objetivos, respetivamente, aplicadas à escolha do servomotor.

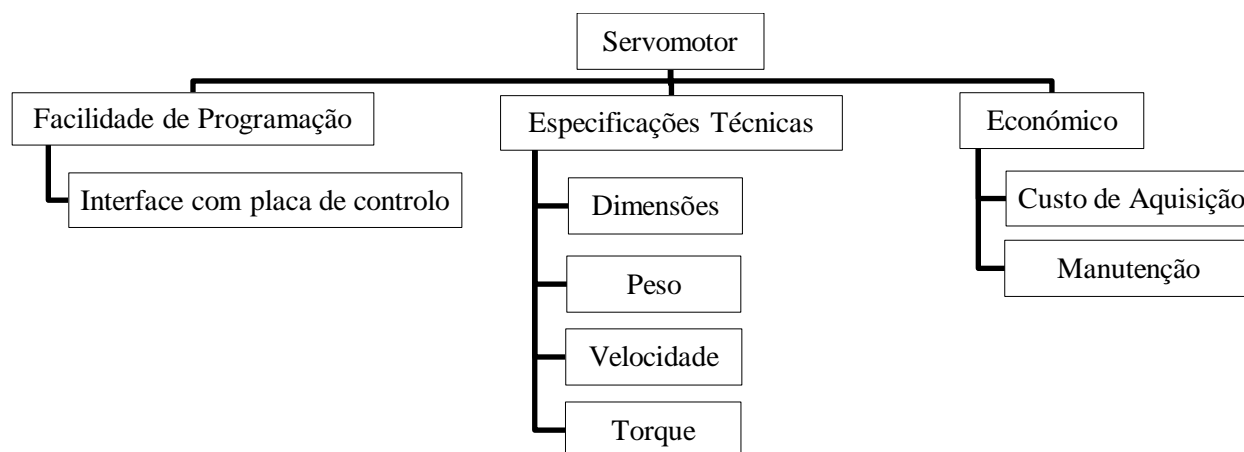


Figura 6.5 - Árvore modelo aplicada à escolha do servomotor

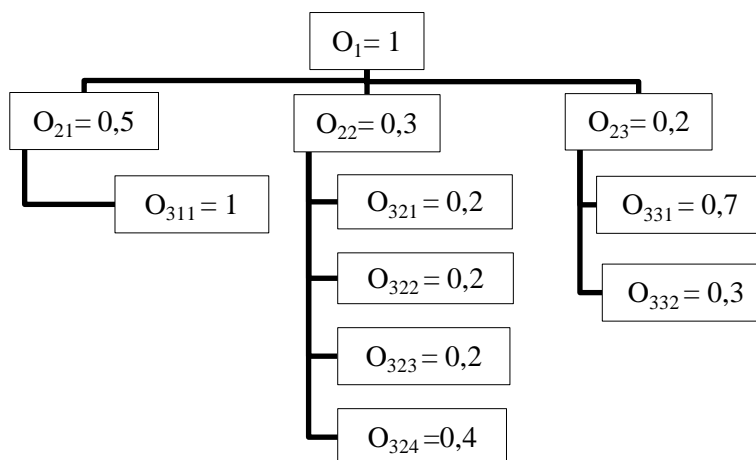


Figura 6.6 - Árvore de objetivos aplicada à escolha do servomotor



Fatores de ponderação:

- Interface com o controlador =  $O_{311} = 1 \times 0,5 \times 1 = 0,5$
- Dimensões =  $O_{321} = 1 \times 0,3 \times 0,2 = 0,06$
- Peso =  $O_{322} = 1 \times 0,3 \times 0,2 = 0,06$
- Velocidade =  $O_{323} = 1 \times 0,3 \times 0,2 = 0,06$
- Torque =  $O_{324} = 1 \times 0,3 \times 0,4 = 0,12$
- Custo de aquisição =  $O_{331} = 1 \times 0,2 \times 0,7 = 0,14$
- Manutenção =  $O_{332} = 1 \times 0,2 \times 0,3 = 0,06$

Tabela 9 - Matriz decisão aplicada à escolha do servomotor

		<i>Parallax-Futaba S148</i>		<i>Power HD-1160A</i>		<i>Hitec HS-322HD</i>		<i>Pololu -High Torque Servo</i>	
<b>Critério</b>	<b>Fator de ponderação</b>	<b>Classificação simples</b>	<b>Classificação ponderada</b>	<b>Classificação simples</b>	<b>Classificação ponderada</b>	<b>Classificação simples</b>	<b>Classificação ponderada</b>	<b>Classificação simples</b>	<b>Classificação ponderada</b>
<b>Interface com o controlador</b>	0,5	4	2	4	2	8	4	3	1,5
<b>Dimensões</b>	0,06	5	0,3	9	0,54	5	0,3	6	0,36
<b>Peso</b>	0,06	5	0,3	8	0,48	5	0,3	4	0,24
<b>Velocidade</b>	0,06	7	0,42	4	0,24	6	0,36	5	0,3
<b>Torque</b>	0,12	6	0,72	4	0,48	6	0,72	8	0,96
<b>Custo de aquisição</b>	0,14	5	0,7	7	0,98	5	0,7	3	0,42
<b>Manutenção</b>	0,06	5	0,3	5	0,3	6	0,36	6	0,36
		Soma	4,74	Soma	5,02	Soma	6,74	Soma	4,14

Após a análise da matriz de decisão da Tabela 9, critérios como a interface com a placa de controle, o preço de aquisição e o torque tiveram um peso fundamental no resultado final. Concluiu-se que a escolha mais adequada seria o servomotor *Hitec HS-322HD*, uma vez que teve a classificação ponderada mais elevada de 6,74.

### 6.1.2.2 Hitec HS-322HD

O servomotor *HS-322HD*, fabricado pela *Hitec*, é um servomotor reconhecido pela boa performance e durabilidade. As suas engrenagens, em *karbonite*, possuem uma resistência 4 vezes superior às engrenagens em *nylon* que a maioria dos servomotores possui. Na Tabela 10 encontram-se as especificações técnicas.

Tabela 10 - Especificações técnicas do *Hitec HS-322HD* [28]

Sistema de controlo	<i>PWM</i>	
Posição neutra ( <i>PWM</i> )	1500 $\mu$ s	
Gama de voltagem	4,8 V	6,0 V
Velocidade	0,19 s/60°	0,15 s/60°
Torque	3 kg cm	3,7 kg cm
Tipo de motor	<i>Cored Metal Brush</i>	
Tipo de potenciômetro	Potenciômetro deslizante	
Tipo de amplificador	Controlo analógico	
Engrenagens	<i>Karbonite</i>	
Dimensões	40×20×36,5 mm	
Massa	43 g	

### 6.1.3 Placa de Controlo

A placa de controlo, escolhida para ser implementada no automatismo com a função de controlar o movimento de posição angular do servomotor, teve como critérios de seleção um compromisso entre precisão no controlo posicional e custo de aquisição e, principalmente, a capacidade de ser programável com recurso à linguagem em LabVIEW. Após uma análise da oferta deste tipo de componente que permite o recurso à linguagem LabVIEW, selecionou-se um conjunto de placas de controlo, e pelo uso de uma ferramenta derivada da matriz de decisão, escolheu-se o que melhor se adapta ao automatismo do projeto.

#### 6.1.3.1 Matriz de decisão aplicada à escolha da placa de controlo

Na Tabela 11 são apresentados os elementos que correspondem aos critérios de avaliação que foram tidos em conta na escolha da placa de controlo, onde estão reunidas informações acerca dos parâmetros essenciais para a comparação entre as placas de controlo selecionadas para este estudo, de modo a garantir a melhor escolha a aplicar no automatismo.

Tabela 11 - Critérios de avaliação da placa de controlo

Elementos	<i>Pololu-Micro Maestro</i>	<i>Arduino Duemilanove</i>	<i>PhidgetServo 1-Motor</i>
<b>Dimensões / mm</b>	30,48×21,59×13	68×53×13	45,72×30,48×13
<b>Resolução / °</b>	0,025	0,09	0,1
<b>LabVIEW</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Interface com Computador</b>	Boa	Boa	Muito Boa
<b>Interface com Servomotor</b>	Muito Boa	Muito Boa	Boa
<b>Custo de aquisição / €</b>	15	17,5	17

A Tabela 12 apresenta a correspondência entre uma hierarquização qualitativa de índices/notas quantitativas, que será designada por classificação simples. Na Figura 6.7 e Figura 6.8 encontram-se a árvore modelo e a árvore de objetivos, respetivamente.

Tabela 12 - Classificação simples

CrITÉrio	<i>Pololu-Micro Maestro</i>	<i>Arduino Duemilanove</i>	<i>PhidgetServo 1-Motor</i>
<b>Dimensões</b>	8	4	6
<b>Resolução</b>	9	8	7
<b>LabVIEW</b>	9	9	9
<b>Interface com computador</b>	7	7	9
<b>Interface com servomotor</b>	8	8	7
<b>Custo de aquisição</b>	8	6	7

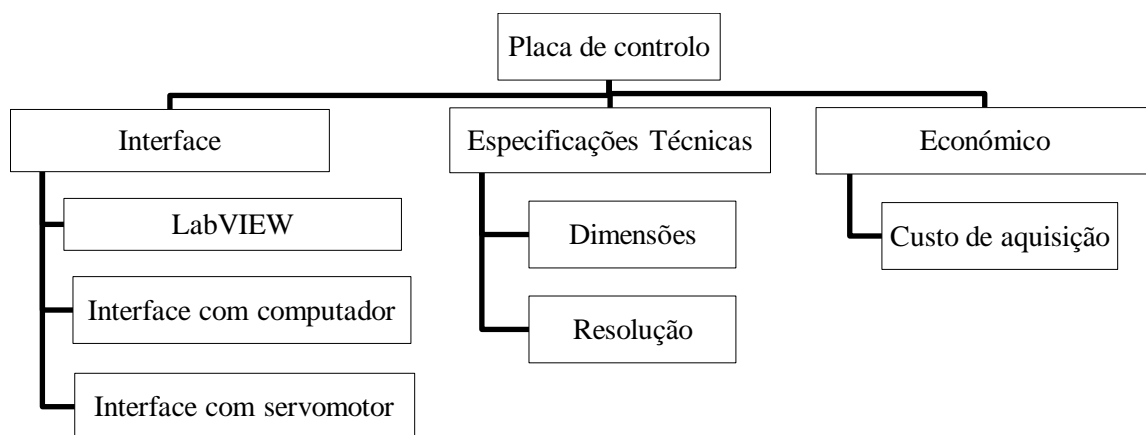


Figura 6.7 - Árvore modelo aplicada à escolha da placa de controlo

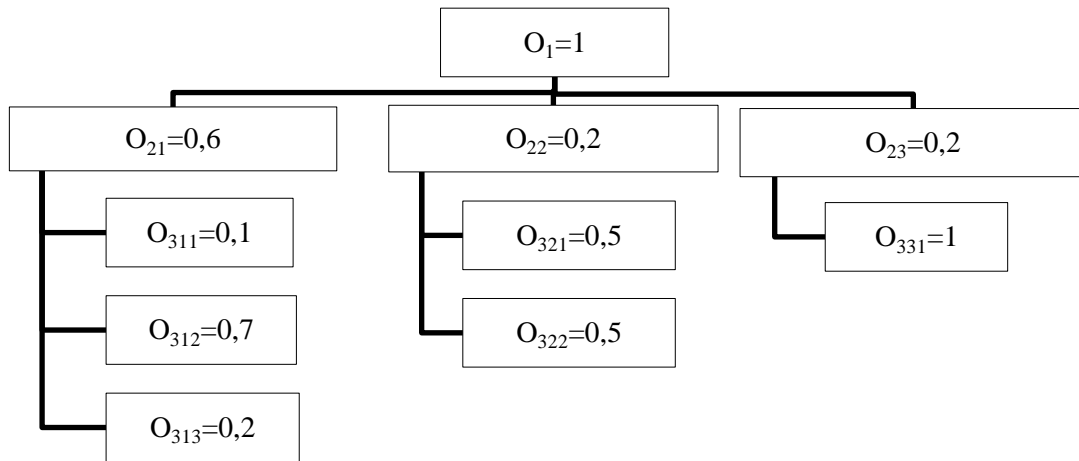


Figura 6.8 - Árvore de objetivos aplicada à escolha da placa de controle

Fatores de ponderação:

- LabVIEW =  $O_{311} = 1 \times 0,6 \times 0,1 = 0,06$
- Interface com computador =  $O_{312} = 1 \times 0,6 \times 0,7 = 0,42$
- Interface com servomotor =  $O_{313} = 1 \times 0,6 \times 0,2 = 0,12$
- Dimensões =  $O_{321} = 1 \times 0,2 \times 0,5 = 0,1$
- Resolução =  $O_{322} = 1 \times 0,2 \times 0,5 = 0,1$
- Custo de aquisição =  $O_{331} = 1 \times 0,2 \times 1 = 0,2$

Tabela 13 - Matriz de decisão aplicada à escolha da placa de controlo

		<i>Pololu-Micro Maestro</i>		<i>Arduino Duemilanove</i>		<i>PhidgetServo 1-Motor</i>	
<b>Critério</b>	<b>Fator de ponderação</b>	<b>Classificação simples</b>	<b>Classificação ponderada</b>	<b>Classificação simples</b>	<b>Classificação ponderada</b>	<b>Classificação simples</b>	<b>Classificação ponderada</b>
<b>LabVIEW</b>	0,06	9	0,54	9	0,54	9	0,54
<b>Interface com computador</b>	0,42	7	2,94	7	2,94	9	3,78
<b>Interface com servomotor</b>	0,12	8	0,96	8	0,96	7	0,84
<b>Dimensões</b>	0,1	8	0,8	4	0,4	6	0,6
<b>Resolução</b>	0,1	9	0,9	9	0,9	7	0,7
<b>Custo de aquisição</b>	0,2	8	1,6	6	1,2	7	1,4
		Soma	7,74	Soma	6,94	Soma	7,86

Após uma análise da Tabela 13, critérios como a interface com o servomotor e com o computador, tiveram um peso fundamental no resultado final. Concluiu-se que a escolha mais adequada seria pela placa de controlo *PhidgetServo 1-Motor*, uma vez que teve a classificação ponderada mais elevada de 7,86.

#### 6.1.3.2 1-Motor

O *PhidgetServo 1-Motor* é uma placa de controlo com a capacidade de controlar um servomotor alimentado diretamente pela porta USB do computador. As especificações técnicas da placa de controlo encontram-se na Tabela 14 seguinte.

Tabela 14 - Especificações técnicas da *PhidgetServo 1-Motor* [29]

<b>PhidgetServo 1-Motor</b>	
<b>Número de portas</b>	1
<b>Período do impulso</b>	20 ms
<b>Duração do impulso mínima</b>	10 $\mu$ s
<b>Duração do impulso máxima</b>	2,55 ms
<b>Resolução do tempo</b>	1 $\mu$ s
<b>Taxa de atualização do controlador</b>	50 Atualizações por segundo
<b>Impedância de saída (controle)</b>	600 $\Omega$
<b>Posição limite mínima</b>	-23,00 °
<b>Posição limite máxima</b>	232,99°
<b>Tensão operacional do motor</b>	5,0 V
<b>USB- Especificação da corrente máxima</b>	500 mA
<b>Consumo de corrente ativo</b>	500 mA
<b>Consumo de corrente inativo</b>	13 mA
<b>Temperatura de funcionamento mínima</b>	0 °C
<b>Temperatura de funcionamento máxima</b>	70 °C

## 7 Chassi de Suporte do Automatismo

O presente capítulo tem como objetivo demonstrar o desenvolvimento do chassi de suporte do servomotor e da placa de controlo que será aplicado no banco de ensaio do LFR. Após o desenvolvimento do chassi de suporte efetuou-se uma análise estrutural de modo a prever a resposta às solicitações durante a sua utilização no LFR. Descreveu-se o processo escolhido para o fabrico dos componentes que constituem o chassi assim como todos os parâmetros que possuem uma influência direta no seu fabrico. Esta sequência do desenvolvimento do chassi é ilustrada na Figura 7.1 seguinte.

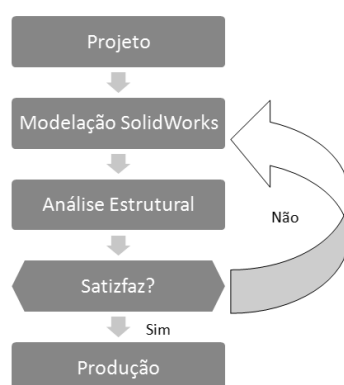


Figura 7.1 - Sequência de projeto

### 7.1 Dimensionamento do Chassi de Suporte

Esta fase do projeto consistiu no desenho de todos os componentes do chassi, através de um programa de desenho assistido por computador (CAD). O *SolidWorks* é uma aplicação de desenho automático com parametrização, que permite esboçar ideias e realizar experiências com diferentes desenhos de forma a criar modelos 3D. O *SolidWorks* é utilizado por estudantes, engenheiros e outros profissionais para produzir componentes (*part*) simples e complexos, conjuntos (*assembly*) e desenhos (*drawing*) [30].

Para a construção de cada componente do chassi utilizou-se um variado leque de ferramentas disponibilizadas pelo *SolidWorks*, *Features*. *Features* são as formas (elementos geométricos simples) e as operações (aplicadas aos elementos) com que se constrói um componente [30]. O desenho 3D de todo o chassi de suporte teve como princípio a simplicidade da forma geométrica de modo a facilitar o seu fabrico. Para tal limitou-se a utilização de *Features* às ilustradas na Tabela 15 abaixo.

Tabela 15 - Descrição das *Features* utilizadas

<i>Features</i>	Descrição
<b>Ressalto</b>	Adiciona material à peça a partir de um esboço 2D
<b>Corte</b>	Remove material de uma peça a partir de um esboço 2D
<b>Arredondamento</b>	Utilizado para arredondar elementos da aresta. Pode remover ou adicionar material dependendo se for uma aresta convexa ou côncava.

Numa primeira abordagem ao dimensionamento assumiu-se, que a placa de controlo e o servomotor estariam no mesmo chassi de suporte. A partir deste pressuposto, desenhou-se um paralelepípedo, com espessura igual à espessura mínima das fixações do servomotor e uma abertura lateral de modo a permitir fixar a placa de controlo e o servomotor ao chassi pela aplicação de parafusos. O servomotor e a placa de controlo estão separados por uma parede que permite reforçar a estrutura e fixar os componentes, como se ilustra na Figura 7.2 seguinte.

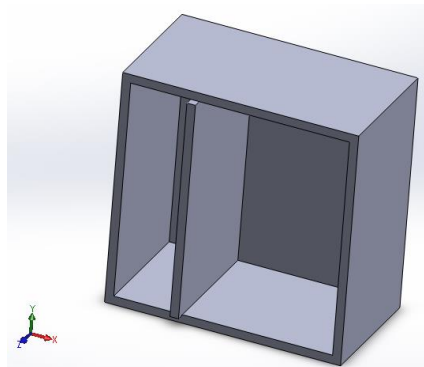


Figura 7.2 - Modelo SW1

Nesta estrutura, aplicaram-se os furos para a saída do eixo do servomotor e da ficha USB da placa de controlo, como se ilustra na Figura 7.3, já com modelos que simulam o servomotor e a placa de controlo embutidos.

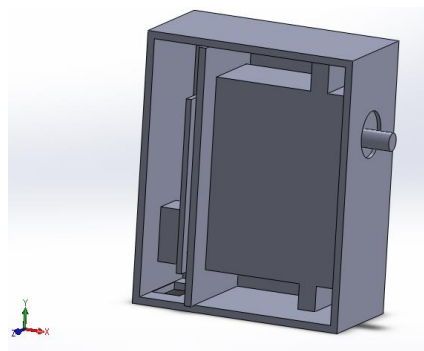




Figura 7.3 - Modelo SW2

Após uma breve análise da estrutura desenhada, concluiu-se que a abertura lateral não permite fixar os parafusos do lado oposto da mesma. Como tal, efetuou-se outro estilo de abertura, em forma de “U” como se observa na Figura 7.4, e adaptou-se toda estrutura a essa nova abertura, com a respetiva tampa. Após estas alterações, aplicou-se uma estrutura simples de fixação ao banco fotométrico do LFR.

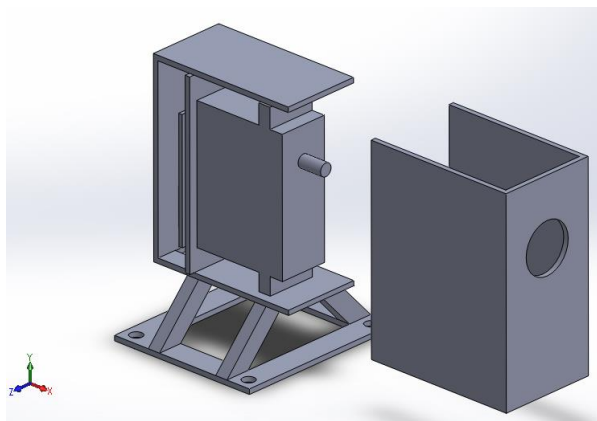


Figura 7.4 - Modelo SW3

Depois da primeira abordagem, ficaram definidas as etapas para o desenho do chassi final, com rigor dimensional. Na Figura 7.5 encontra-se o resultado do desenho 3D do chassi de suporte. A peça que se encontra na parte central da Figura, é aquela em que o servomotor e a placa de controlo são fixados, a peça que se encontra na parte direita da Figura consiste na fixação ao banco de ensaio do LFR e, por último, a peça da parte esquerda da Figura, que consiste numa tampa que tem a função de proteger a parte mecânica e eletrónica do automatismo.

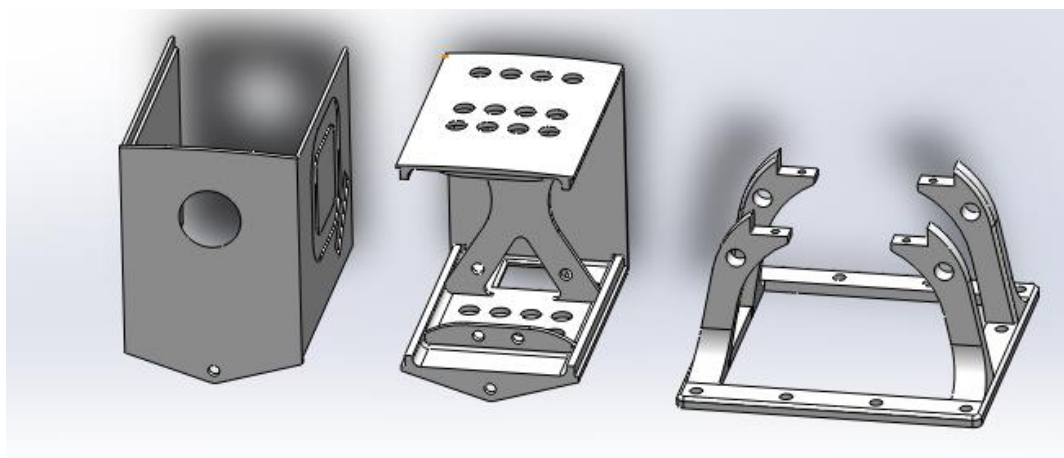


Figura 7.5 - Modelo SW final

Na Figura 7.6 encontram-se a vista explodida de todos os componentes.

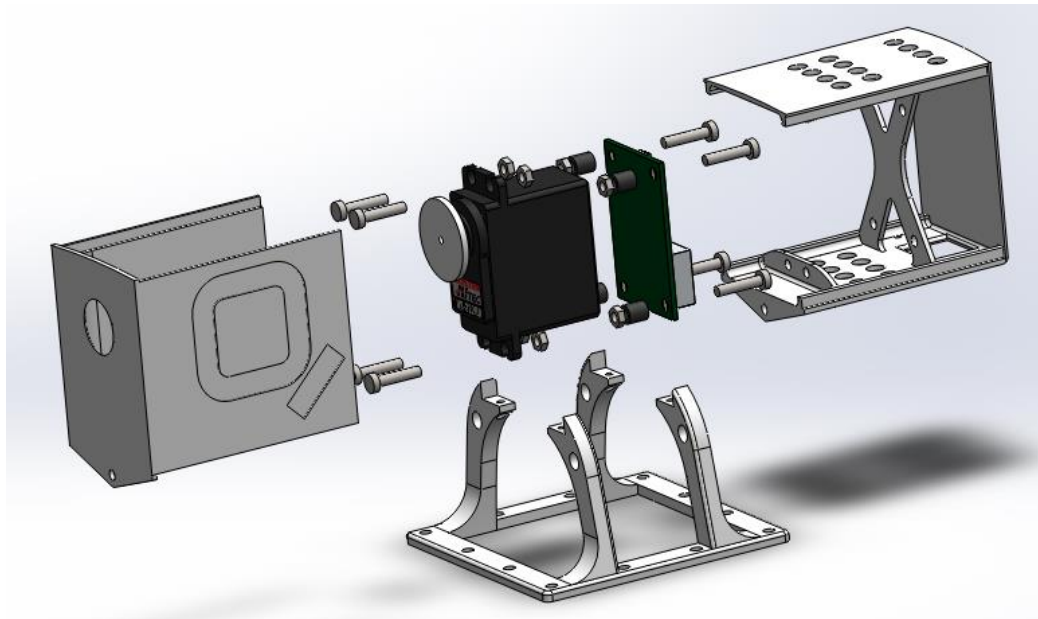


Figura 7.6 - Vista explodida da montagem do modelo SW final

## 7.2 Fabrico do Chassi

Para o fabrico do chassi optou-se pela tecnologia de impressão 3D, tanto para a produção do protótipo como para a produção do chassi final, não obstante, que este tipo de processo é aplicado usualmente para a produção de protótipos. Ressalve-se, que para o fabrico do chassi, poder-se-ia optar pelos processos de fabrico convencionais. Todavia este tipo de processos, pelos seus elevados custos, não são adequados para a produção de apenas uma peça mas sim para um grande número de peças, de modo a compensar o investimento inicial. Devido à existência, no mercado nacional, de empresas que fornecem o serviço de impressão 3D, capazes de produzir peças a partir de plásticos resistentes, duráveis e com boas propriedades mecânicas, de uma forma rápida e relativamente acessível, considerou-se este o processo de fabrico mais adequado para a produção das peças que constituem o chassi.

### 7.2.1 Introdução à impressão 3D

A impressão 3D, baseada em modelos tridimensionais em *CAD*, é um processo inovador que diminui drasticamente o processo de fabricação de protótipos e ferramentas. A redução do tempo e de custo proporcionada pela impressão tridimensional revolucionou a prototipagem e a manufatura [31].

Na impressão 3D existe uma grande variedade das tecnologias do processo de impressão. Não existindo processos ideais, cada um apresenta, consoante a aplicação em causa, vantagens e desvantagens. Na altura de se optar por um processo, devem ser tidos em conta fatores como as propriedades físicas, mecânicas e estéticas exigidas à peça, o material a utilizar, a disponibilidade das tecnologias, os custos envolvidos e os prazos para a realização da peça impressa [32]. As impressoras 3D utilizadas para a produção do chassi recorrem à técnica de construção por deposição de material fundido (*Fused Deposition Modeling - FDM*). Este processo consiste basicamente na produção de modelos por adição sucessiva de material, camada por camada, até atingir o modelo pretendido, Figura 7.7.

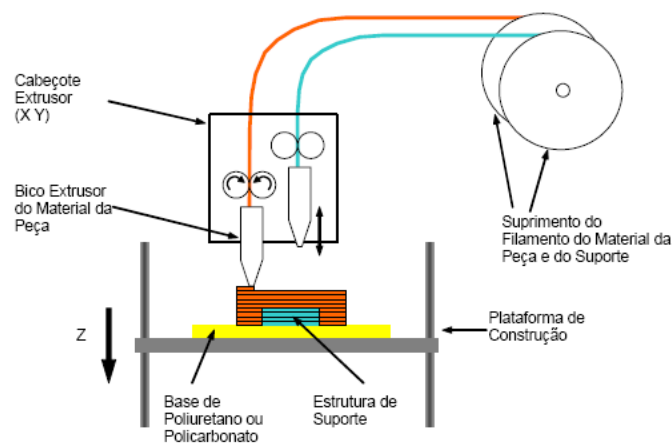


Figura 7.7 - Princípio do processo *FDM* da *Stratasys* (adaptado de VOLPATO et al., 2007).

Etapas do processo *FDM* [33]:

- Filamentos cilíndricos, com espessura normalmente na ordem dos milímetros, são armazenados em bobines e alimentados mecanicamente para a cabeça de extrusão.
- A cabeça de extrusão funciona como um funil, na medida em que diminui a espessura dos filamentos para valores abaixo de 2 mm. Os filamentos são aquecidos no ejetor.
- As cabeças movimentam-se sob dois eixos e depositam a matéria-prima sobre a base de suporte. A máquina literalmente desenha cada uma das camadas, que são impressões bidimensionais.
- Após o fabrico de cada “camada”, a base onde assenta o sólido desce exatamente na mesma medida da espessura do filamento. Deste modo, é possível adicionar mais uma camada. O processo repete-se até que todo o sólido fique fabricado.

## 7.2.2 Processo *FDM*

Como já referido anteriormente, todos os componentes serão produzidos com recurso à impressão 3D pelo processo *FDM*. É essencial compreender como o processo *FDM* influencia as propriedades

mecânicas do material fabricado, em comparação com peças do mesmo material fabricadas pelo processo clássico de injeção de *ABS* em molde. No sentido da importância das propriedades mecânicas das peças fabricadas pelo processo *FDM*, muitos estudos têm sido efetuados de modo a compreender os parâmetros de impressão que influenciam as propriedades da peça impressa. O conhecimento destes parâmetros e o modo com influenciam as propriedades das peças, permite otimizar a resistência estrutural do chassi, de modo a que possa manter a sua integridade durante as condições de serviço a que estará sujeito no LFR.

### 7.2.2.1 Parâmetros que influenciam a impressão 3D

Segundo *Ahn et al.* [34], existe um conjunto de parâmetros que têm maior influência nas peças fabricadas pelo processo *FDM*;

- Espessura do filamento;
- Espaçamento entre filamentos;
- Temperatura de extrusão do filamento;
- Orientação do filamento;
- Cor.

Segundo esse mesmo estudo, destes cinco parâmetros, a temperatura de extrusão, a cor e a espessura do filamento têm uma influência muito reduzida face ao espaçamento entre filamentos e à orientação de deposição do filamento.

No processo *FDM*, existem vários tipos de orientação de posição do filamento, no entanto focaram-se apenas 3 tipos que se ilustram na Figura 7.8 seguinte.

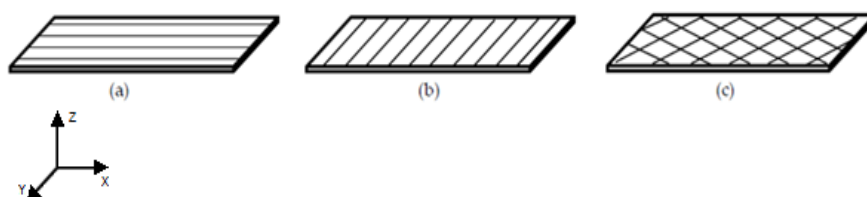


Figura 7.8 - Orientação de posição do filamento [35]

- a) Longitudinal - A orientação de deposição do filamento de *ABS* faz um ângulo de  $0^\circ$  com o eixo dos *XX*. Depositando a camada superior (seguinte) com a mesma orientação da camada inferior.

- b) Transversal - A orientação de deposição do filamento de *ABS* faz um ângulo de 90° com o eixo dos XX. Depositando a camada superior (seguinte) com a mesma orientação da camada inferior.
- c) *Criss-cross* - A orientação de deposição do filamento de *ABS* faz um ângulo de 45° com o eixo dos XX. Depositando a camada superior (seguinte) com a orientação de -45° relativamente à camada inferior.

#### 7.2.2.2 Propriedades mecânicas das peças fabricadas pelo processo *FDM*

Para se compreender como as propriedades mecânicas das peças fabricadas pelo processo *FDM* reagem quando solicitadas mecanicamente, é necessário compreender como se comporta o material quando sujeito a 5 tipos de ensaios mecânicos [35], ensaios de tração, ensaios de compressão, ensaios de flexão, ensaios de impacto e ensaios de fadiga. No entanto, este subcapítulo irá focar-se nos ensaios de tração/compressão e compreender como as constantes elásticas do material variam quando comparadas com peças fabricadas por injeção de *ABS* em molde.

Para os ensaios efetuados por *Ziemian et al* [35] a impressora 3D utilizada foi uma *Strasys Vantage-i Machine*. Os parâmetros da impressora encontram-se na Tabela 16, e foram constantes para todas as peças fabricadas.

Tabela 16 - Parâmetros da impressora [35]

Parâmetro	Valor
Espaçamento entre filamentos	0,0 mm
Espessura do filamento	0,3048 mm
Altura do filamento	0,1778 mm
Preenchimento	Sólido
Temperatura de extrusão	320 °C
Temperatura da cabine	80 °C

Para este estudo [35], foram efetuados ensaios de tração de modo a compreender as propriedades mecânicas de peças fabricadas pelo processo *FDM* em comparação com uma peça do mesmo material fabricada por processo de injeção de *ABS* em molde.

A Figura 7.9 apresenta os resultados do estudo, para um espaçamento entre filamentos nulo, espessura de filamento de 0,3048 mm, sendo a orientação do filamento o único parâmetro que varia. Os valores do gráfico da Figura 7.9 encontram-se na primeira Tabela do Anexo I.

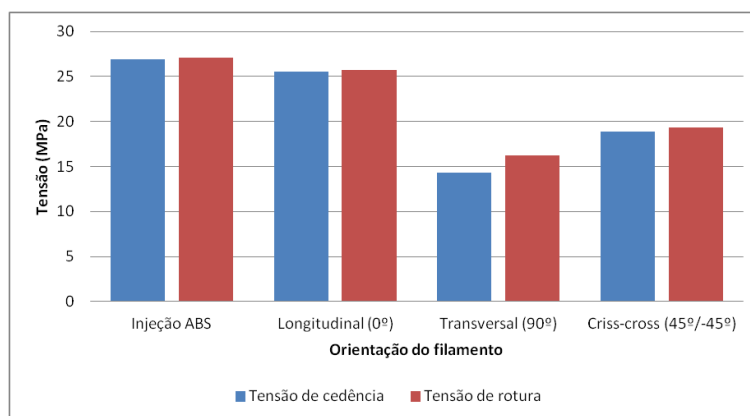


Figura 7.9 - Ensaio de tração [35]

Pode concluir-se, a partir da análise do gráfico da Figura 7.9, que as tensões das peças fabricadas pelo processo *FDM*, com filamentos com orientação longitudinal em que a força exercida tem a mesma direção do eixo dos filamentos da peça, são as que mais se aproximam das peças por injeção de *ABS* em molde, menos 5,3 % e 5,2 % em relação a uma peça fabricada por injeção em molde para a tensão de cedência e tensão de ruptura, respetivamente. Para o caso em que a força exercida sobre a peça tem uma direção perpendicular ao eixo dos filamentos da mesma, existe uma diferença que pode atingir menos 46,8 % e 40,2 % para tensão de cedência e de ruptura, respetivamente.

Segundo o mesmo estudo foram efetuados ensaios mecânicos de compressão. O gráfico da Figura 7.10 apresenta os resultados do ensaio. Os valores do gráfico encontram-se na segunda Tabela do Anexo I.

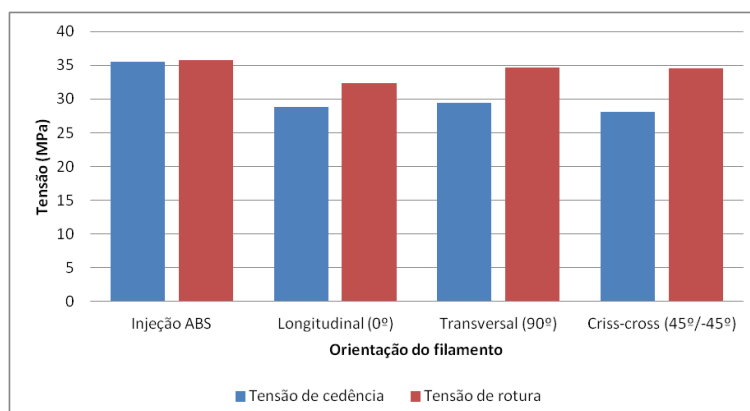


Figura 7.10 – Ensaio de compressão [35]

Pode concluir-se, a partir da análise do gráfico da Figura 7.10, que os resultados das peças fabricadas pelo processo *FDM* quando sujeitas a forças de compressão possuem propriedades mecânicas mais próximas das peças produzidas por injeção de *ABS* em molde. As peças de filamentos com orientação transversal foram as que melhores propriedades mecânicas apresentaram no conjunto de peças fabricadas pelo processo *FDM*.

Nos trabalhos de *Li et al.* [36], analisou-se o comportamento da rigidez das peças fabricadas pelo processo *FDM*. As propriedades elásticas do filamento *ABS-P400*, material utilizado neste estudo, encontram-se na Tabela 17 abaixo.

Tabela 17 - Propriedades elásticas do filamento *ABS-P400* [36]

Constantes elásticas	Valor
Módulo de <i>Young</i> , <i>E</i>	2230 MPa
Módulo de torsão, <i>G</i>	833 MPa
Coefficiente de <i>Poisson</i> , <i>v</i>	0,34

Segundo este estudo, o coeficiente de *Poisson* (*v*) não varia entre as peças fabricadas por injeção de *ABS* em molde e as fabricadas pelo processo *FDM*, contrariamente ao módulo de elasticidade (Módulo de *Young*) que sofre variações.

Os resultados dos ensaios experimentais efetuados encontram-se na Tabela 18 seguinte.

Tabela 18 - Módulo de elasticidade [36]

Orientação	Módulo de elasticidade / MPa	Diferença / %
Longitudinal [0 /90]°	1772,9	-20,5
[15 /-75]°	1623,4	-27,2
[30 /- 60]°	1440,4	-35,5
<i>Criss-cross</i> (45/-45)°	1369,6	-38,6

Pode concluir-se que o módulo de elasticidade de uma peça fabricada pelo processo *FDM* revela grandes diferenças em relação a uma peça fabricada por injeção de *ABS* em molde, atingindo cerca de -38,6% no caso da orientação de deposição do filamento em *Criss-cross*.

Para o cálculo do módulo de torsão, a partir da análise de todos os trabalhos anteriormente referidos, não foi possível retirar qualquer relação ou conclusão. No entanto, a partir da Equação 7.1, para materiais ortotrópicos, para uma orientação de deposição *Criss-cross* consegue aproximar-se o valor do módulo de torsão.

$$G_{xy} = \frac{E_x E_y}{E_x + E_y + E_x v}, G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} \quad \text{Equação 7.1}$$

A orientação de deposição *Criss-cross*, possui um módulo de elasticidade igual nas duas direções, ou seja  $E_x = E_y = 1369,6$  MPa. Para um coeficiente de *Poisson*  $v = 0,34$ , o módulo de torsão toma um valor de  $G=511,2$  MPa, Tabela 19 abaixo

Tabela 19 - Módulo de elasticidade com orientação *Criss-cross*.

Orientação	Módulo de torsão, G /MPa	Diferença / %
<i>Criss-cross (45/-45)°</i>	511,04	-38,6

### 7.2.2.3 Conclusões

A partir deste estudo compreende-se que conhecer o comportamento mecânico de peças fabricadas pelo processo *FDM* é fundamental uma vez que as propriedades mecânicas das peças fabricadas por este processo alteram-se consoante alguns parâmetros do próprio fabrico. Os resultados demonstram que a orientação de deposição do filamento é o parâmetro que mais influencia as propriedades das peças. O espaçamento entre filamentos também possui efeitos significativos. Deste modo, a partir de uma boa seleção destes parâmetros, o processo *FDM* possui a capacidade de produzir peças finais com as propriedades desejadas, dentro dos limites impostos pelo próprio processo. Conhecer o comportamento mecânico de peças obtidas pelo processo *FDM* não constitui uma atividade simples, e, apesar de não existir nenhum trabalho que se foque na influência do processo *FDM* sobre o material com que serão fabricadas as peças que constituem o chassi, *ABS-P430*, é possível ter-se uma noção da alteração das propriedades mecânicas do material devido às semelhanças do mesmo.

Na Tabela 20, encontra-se um resumo dos resultados dos ensaios efetuados de modo a compreender a variação das propriedades mecânicas das peças produzidas pelo processo *FDM*.

Tabela 20 - Relações retiradas dos ensaios efetuados [34] [35]

	Tração		Compressão		Módulo de elasticidade
	Tensão de cedência	Tensão de rotura	Tensão de cedência	Tensão de rotura	
<b>Longitudinal (0°)</b>	$\sigma_{FDM} = \frac{\sigma_{ABS}}{1,056}$	$= \frac{\sigma_{FDM}}{1,063}$	$\sigma_{FDM} = \frac{\sigma_{ABS}}{1,231}$	$= \frac{\sigma_{FDM}}{1,108}$	$E_{FDM} = \frac{E_{ABS}}{1,628}$
<b>Transversal (90°)</b>	$\sigma_{FDM} = \frac{\sigma_{ABS}}{1,878}$	$= \frac{\sigma_{FDM}}{1,890}$	$\sigma_{FDM} = \frac{\sigma_{ABS}}{1,204}$	$= \frac{\sigma_{FDM}}{1,032}$	-
<b><i>Criss-cross (45°/-45°)</i></b>	$\sigma_{FDM} = \frac{\sigma_{ABS}}{1,426}$	$= \frac{\sigma_{FDM}}{1,435}$	$\sigma_{FDM} = \frac{\sigma_{ABS}}{1,262}$	$= \frac{\sigma_{FDM}}{1,036}$	$E_{FDM} = \frac{E_{ABS}}{1,258}$



As relações que se encontram na Tabela 20 não constituem relações exatas e permitem apenas compreender as alterações que as propriedades mecânicas do material sofrem quando fabricado pelo processo *FDM*.

### **7.2.3 Análise estrutural ao chassi de suporte do servomotor e da placa de controlo**

Nesta fase do projeto ocorreu a necessidade de se realizar um conjunto de análises estruturais com a finalidade de atingir uma solução que satisfaça as especificações do projeto.

Existindo uma grande variedade de problemas deste tipo que podem ser encontrados em Engenharia, o computador atingiu um estatuto de ferramenta obrigatória para o desenvolvimento de projetos, possibilitando analisar modelos complexos sujeitos a um variado conjunto de carregamentos ou forças com um maior grau de precisão e maior rapidez, com uma capacidade de oferecer uma interface gráfica muito intuitiva. Recorreu-se à utilização do *SolidWorks Simulation* para efetuar a análise estrutural ao chassi, de modo a prever a resposta do mesmo às solicitações durante o seu funcionamento e identificar as deformações máximas e os estados de tensão que este irá sofrer a partir de momentos e forças que serão aplicados em locais específicos.

#### **7.2.3.1 *SolidWorks Simulation***

O *SolidWorks Simulation* é uma ferramenta de simulação virtual totalmente integrada no *SolidWorks*. Ao longo deste subcapítulo serão apresentados os resultados do estudo, mostrando todas as condições de fronteira, de carga, de contacto e de fixação que se adotaram. O *SolidWorks Simulation* recorre ao método dos elementos finitos para fazer estas análises estruturais, pelo que é fundamental compreender este método.

##### **7.2.3.1.1 Método dos elementos finitos**

Todos os fenómenos que ocorrem na natureza podem ser descritos por leis da física e modelados através de um conjunto de equações, que exprimem o comportamento do sistema físico através de relações entre as variáveis e os parâmetros que descrevem o sistema. Devido à complexidade deste conjunto de equações era recorrente simplificar estas equações, ou os seus domínios, de modo a atingir as soluções por uma via analítica. Face a esta dificuldade, e com o desenvolvimento dos computadores, foi possível, através de modelos matemáticos simplificar a resolução de problemas práticos de engenharia. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico poderoso capaz de analisar e executar simulações em vários domínios da engenharia. Neste método o domínio do problema é dividido em vários subdomínios, onde em cada subdomínio, denominado elemento, as equações que descrevem o fenómeno são aproximadas a partir de um método variacional, substituindo eficazmente um problema complexo por muitos problemas simples que podem ser resolvidos simultaneamente [37].

Uma análise pelo MEF consiste das seguintes etapas:

- Discretização do domínio em elementos (malha);
- Cálculo das incógnitas do problema;
- Visualização e interpretação dos resultados.

### **7.2.3.2 Análise estrutural**

O procedimento usado no programa informático *SolidWorks Simulation* para a análise numérica da estrutura vai ser composto pelas seguintes etapas:

- Definir as unidades de análise;
- Selecionar o material;
- Criar um estudo;
- Aplicar fixações;
- Aplicar contactos entre conjuntos;
- Aplicar forças e momentos que atuam sobre a estrutura;
- Gerar a malha;
- Executar a análise;
- Analisar os resultados.

#### **7.2.3.2.1 Unidades de análise**

As unidades utilizadas para efetuar a análise ao chassi, estão de acordo com o Sistema Internacional de Unidade.

#### **7.2.3.2.2 Material**

Os termoplásticos apresentam uma excelente combinação de propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e químicas, bem como facilidade de processamento e um preço relativamente moderado. A base de dados do *SolidWorks* possui um vasto leque de termoplásticos. Como demonstrado no subcapítulo 7.2.2, no processo de fabrico das peças com recurso à impressão 3D pelo método *FDM*, as propriedades mecânicas do material sofrem alterações que devem ser tidas em conta, uma vez que esta alteração das propriedades mecânicas da peça impressa é um fator preponderante nas análises estruturais. As relações entre as propriedades mecânicas do material quando fabricado pelo processo clássico de injeção de *ABS* em molde e fabricadas pelo processo *FDM* encontram-se na Tabela 21, para uma deposição *Criss-Cross*, que é a predefinida da impressora *Dimension Elite* da *Stratasys*, e a escolhida para fabricar as peças que constituem o chassi. Salienta-se que as relações que se encontram na referida Tabela, não constituem relações exatas, permitindo apenas, compreender as alterações das propriedades mecânicas do material, de modo a introduzir um fator adicional que torne a análise estrutural mais realista.

Tabela 21 – Relações entre Injeção em molde de ABS e FDM

	Propriedade	Criss-cross (45°/-45°)
<b>Tração</b>	Tensão de cedência	$\sigma_{FDM} = \frac{\sigma_{ABS}}{1,426}$
	Tensão de rotura	$\sigma_{FDM} = \frac{\sigma_{ABS}}{1,435}$
<b>Compressão</b>	Tensão de cedência	$\sigma_{FDM} = \frac{\sigma_{ABS}}{1,262}$
	Tensão de rotura	$\sigma_{FDM} = \frac{\sigma_{ABS}}{1,036}$
	Módulo de elasticidade	$E_{FDM} = \frac{E_{ABS}}{1,258}$

Sendo assim, e tendo como base as propriedades mecânicas fornecidas pelo fabricante para o *ABSPlus-430*, calcularam-se as novas propriedades das peças do chassi que serão fabricadas pelo processo *FDM*. Essas propriedades encontram-se na Tabela 22 e são as propriedades necessárias para efetuar a análise estrutural com recurso ao programa informático *SolidWorks Simulation*.

Tabela 22 - Propriedades mecânicas do *ABSPlus-P430* em peças fabricadas pelo processo *FDM*

Propriedade	ABS-P430-FDM	Unidades
<b>Módulo de elasticidade</b>	1844,197	N/m <sup>2</sup>
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,394	N/A
<b>Módulo de torsão</b>	510,933	N/m <sup>2</sup>
<b>Densidade</b>	961	kg/m <sup>3</sup>
<b>Tensão de cedência</b>	25,95	N/m <sup>2</sup>

### 7.2.3.2.3 Criar estudo

Ao criar o estudo, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto ao tipo de análise. Na grande maioria dos casos, as estruturas são submetidas a ações dinâmicas, devendo ser considerada a variação no tempo e as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos componentes está sujeito. No entanto, em diversas situações, é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia [38]. Sendo assim, a análise estrutural ao chassi será estática assumindo que esta possui um comportamento linear do material. Este tipo de estudo permite calcular deslocamentos, reações nas ligações ao exterior, deformações e tensões.

#### 7.2.3.2.4 Fixações

O chassi que irá suportar o servomotor e a placa de controlo será fixado com recurso a parafusos aplicados nos 12 furos localizados na estrutura que se encontra no banco fotométrico do LFR. Esta fixação irá restringir o movimento de todo o chassi nas três direções. A funcionalidade do *SolidWorks Simulation* que simula este tipo de restrição denomina-se “*fixed geometry*”. A partir de ensaios prévios, concluiu-se que o modo como esta estrutura é fixa ao suporte, que se encontra no banco fotométrico do LFR, tem uma elevada influência nos esforços a que está sujeita durante o seu funcionamento. Deste modo, não sendo necessário fixar-se o chassi a partir dos 12 parafusos que a estrutura dispõe para fixação, uma fixação deficiente poderá por toda a resistência da estrutura em causa. É importante para a calibração de lâmpadas e luxímetros que o automatismo seja de fácil remoção, uma vez que se encontra no banco fotométrico entre os meios experimentais utilizados nas calibrações.

Para os ensaios selecionou-se um conjunto de 3 formas diferentes de fixação, dentro das fixações possíveis, tendo em conta que quando menor for o número de fixações maior a facilidade de se retirar o automatismo do banco de ensaio.

Na Figura 7.11 encontra-se a fixação mais adequada, onde o chassi é fixo pelos 12 furos disponíveis. Esta fixação, a partir de agora, denominar-se-á Fixação A.

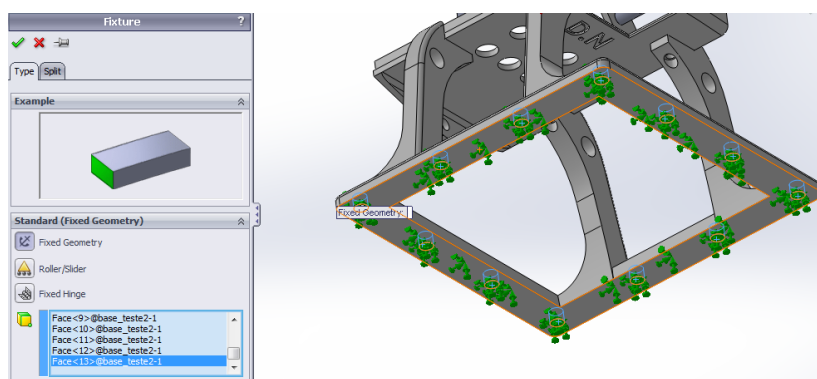


Figura 7.11 - Fixação A

Na Figura 7.12 encontra-se a fixação menos adequada, onde o chassi é fixo pelos 4 furos disponíveis na estrutura, um em cada canto. Esta fixação, a partir de agora, denominar-se-á Fixação B.

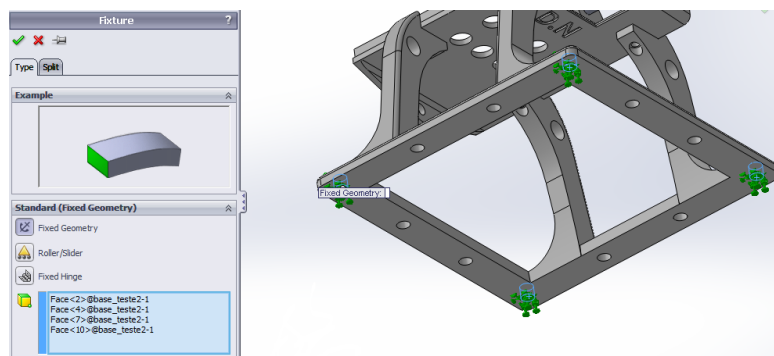


Figura 7.12 - Fixação B

Na Figura 7.13 encontra-se a fixação intermédia, onde o automatismo é fixo pelos 4 furos disponíveis na estrutura, um em cada canto e, ainda, por 2 furos adjacentes aos dois apoios da frente. Esta fixação, a partir de agora, denominar-se-á Fixação C.

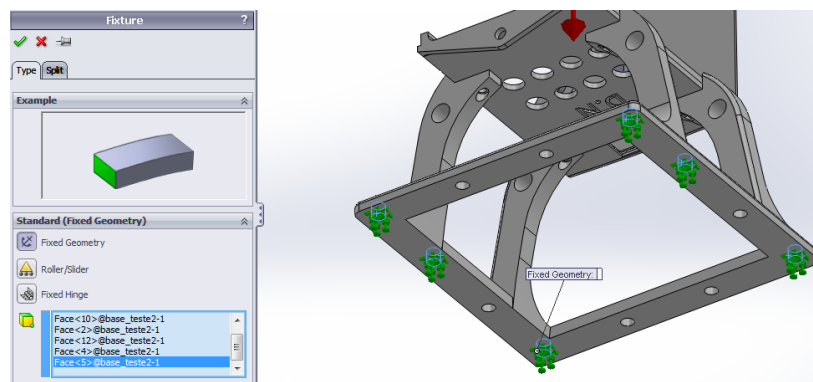


Figura 7.13 - Fixação C

#### 7.2.3.2.5 Contactos entre conjuntos

O contacto entre os conjuntos, das três peças que constituem a estrutura de suporte do servomotor e da placa de controlo, foi considerado como “bonded”, como ilustrado na Figura 7.14. Com esta opção os componentes em contacto atuam como se fossem um só (colados-bonded).

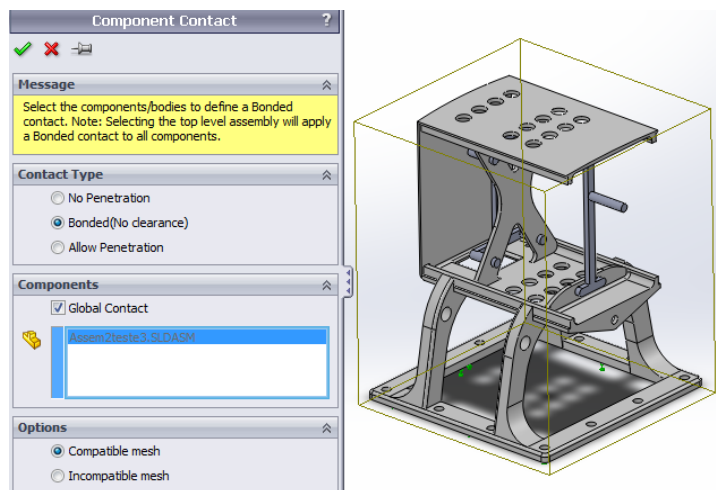


Figura 7.14 - Contactos *bonded*

#### 7.2.3.2.6 Forças e momentos externos

As forças aplicadas sobre o chassi segundo uma direção vertical e no sentido descendente, que se encontram na Tabela 23, referem-se ao peso que o servomotor, a placa de controlo e o acessório que impede a passagem de luz exercem sobre o chassi. A força gravítica que atua sobre o chassi também é incluída no estudo. O momento aplicado no eixo do servomotor consiste no torque máximo que o servomotor transmite segundo as especificações do fabricante. As forças estão aplicadas nos centros de gravidade de cada componente, Figura 7.15, previamente calculados.

Tabela 23 - Forças aplicadas sobre a estrutura

	Intensidade	Unidades
<b>F1</b>	0,167	N
<b>F2</b>	0.422	N
<b>F3</b>	0,095	N
<b>M</b>	0,294	Nm

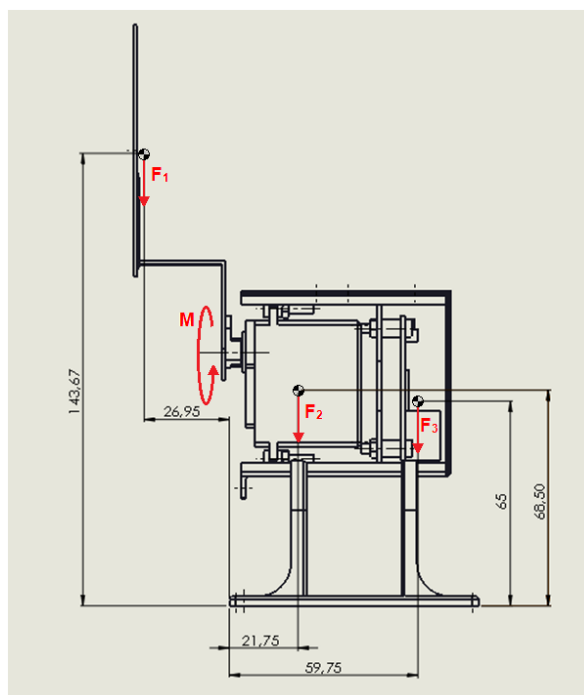


Figura 7.15 - Forças aplicadas sobre todos os componentes. (Dimensões em mm)

Para se efetuar a análise numérica substituiu-se o servomotor e a placa de controlo por acessórios rígidos, de forma a analisar apenas os esforços que o chassi sofre, Figura 7.16. Nestes acessórios rígidos foram aplicadas as forças e momentos a que o chassi estará sujeito.

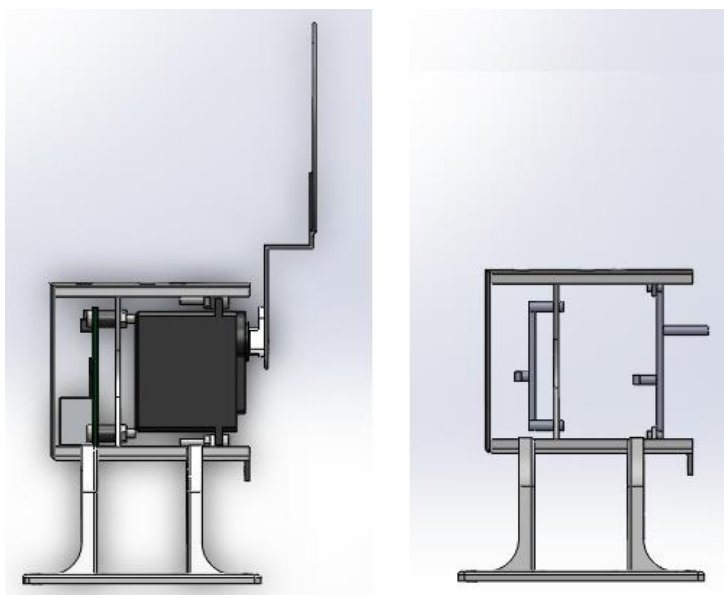


Figura 7.16 - Chassi com acessórios de substituição rígidos

### 7.2.3.2.7 Geração da malha

O processo de divisão dos modelos é denominado geração da malha. A geração da malha é uma etapa crucial da análise do projeto.

Tipos de malhas:

- Malha sólida;
- Malha de casca;
- Malha de viga;
- Malha mista.

O *SolidWorks Simulation* efetua a estimativa de um tamanho de elemento global para que o modelo tenha em consideração o seu volume, área da superfície e outros detalhes geométricos. O tamanho da malha que se gera (número de nós e elementos) depende da geometria e dimensões do modelo, tamanho do elemento, tolerância da malha, controle da malha e especificações de contato.

Neste projeto, para efetuar a análise numérica, recorrer-se-á ao tipo de malha mista, uma vez que foi o tipo de malha escolhida pelo programa informático automaticamente uma vez que o chassi possui vários tipos de geometrias. No processo de geração de uma malha mista, de uma peça ou de um conjunto de peças, o programa informático permite optar por dois parâmetros com base nos tipos de elementos para a geração da malha:

- Malha com qualidade *draft* - Gera elementos tetraédricos lineares.
- Malha com qualidade *high* - Gera elementos tetraédricos parabólicos.

Um elemento tetraédrico linear é definido por 4 nós de canto ligados entre si por 6 arestas retas. Um elemento tetraédrico parabólico é definido por 4 nós de canto, 6 nós intermédios e 6 arestas.

Na Figura 7.17 ilustra-se o pormenor do elemento sólido linear de uma parte do chassi de suporte para uma dimensão do elemento de 4 mm, uma tolerância de 2 mm e com uma qualidade de malha “*draft*”.

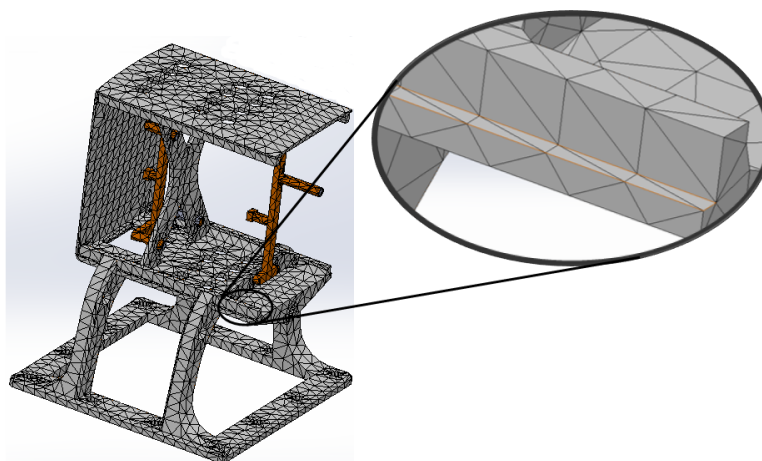


Figura 7.17 - Pormenor do elemento sólido linear



### 7.2.3.2.8 Análise de resultados

No estudo de convergência da malha, os ensaios numéricos iniciais consideram uma malha com uma dimensão média do elemento finito de 6 mm, uma vez que foi o número inteiro imediatamente inferior à dimensão sugerida pelo programa informático. Posteriormente, a dimensão média da malha foi diminuída com intervalos de 1 mm até ao valor limitado pela capacidade computacional do computador utilizado para o efeito. Foram efetuados ensaios para cada tipo de fixação com elementos “*draft*” e elementos “*high*”. Para cada um dos ensaios efetuados foram extraídos os dados relativos ao tamanho do elemento, tolerância do elemento, nº de elementos, nº de nós, tensão máxima e deslocamento. O deslocamento máximo representa o valor absoluto dos deslocamentos existentes nas três direções x, y e z.

Nas Tabelas do Anexo II são apresentados os valores obtidos para a malha mista com elementos “*high*” e elementos “*draft*”, consoante o tipo de fixação A, B e C. A análise cuidada dos gráficos da Figura 7.18 e Figura 7.19 permite concluir que os resultados apresentam um comportamento definido para a tensão máxima a que o chassi estará sujeito.

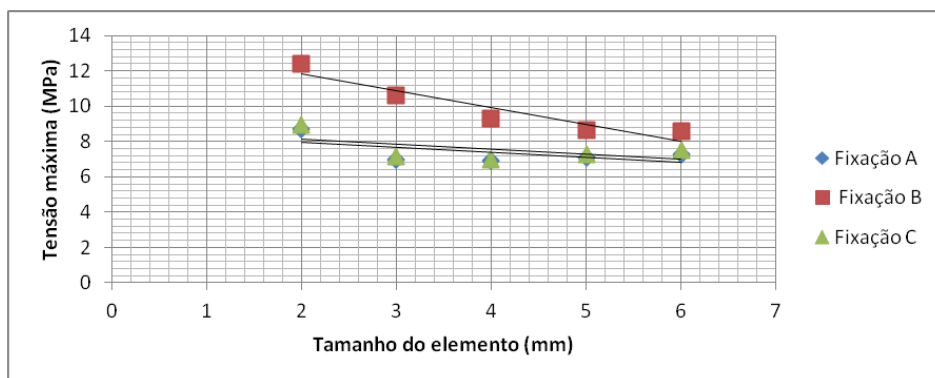


Figura 7.18 - Análise para a tensão máxima com elementos “*draft*”

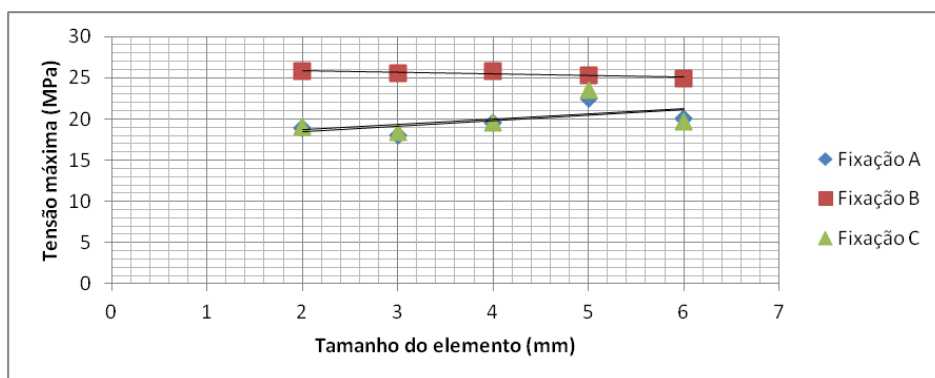


Figura 7.19 - Análise para a tensão máxima com elementos “*high*”

Numa análise geral dos dois gráficos, é importante referir que, a partir da distribuição de tensões segundo o critério de *Von Mises*, os resultados da análise estrutural das tensões máximas sofridas pelo chassi possuem um valor muito aproximado para a mesma dimensão do elemento, quando a estrutura tem um tipo de Fixação A ou C. Quando o chassi possui uma Fixação B, os resultados da análise revelam que é nesta situação que o chassi está sujeito às tensões mais elevadas.

De facto, no 1º gráfico representado na Figura 7.20, referente a uma análise estrutural com elementos do tipo “*draft*”, verifica-se uma tendência do aumento da tensão máxima no conjunto completo com a diminuição do tamanho médio do elemento finito. No 2º gráfico, relativamente a uma análise estrutural com elementos do tipo “*high*”, o comportamento dos resultados revela também uma tendência. A diminuição do tamanho médio do elemento finito é acompanhada por um aumento da tensão máxima no conjunto quando o chassi possui uma fixação do tipo B, quando o chassi possui uma fixação do tipo A ou C os resultados têm uma tendência contrária.

Relativamente ao deslocamento máximo observa-se, a partir da análise dos gráficos da Figura 7.20 e Figura 7.21, um comportamento mais uniforme quando o estudo é efetuado com elementos “*high*”, tendo estes deslocamentos variações mínimas consoante o tamanho do elemento. Para uma análise com elementos “*draft*”, observa-se uma tendência de aumento do deslocamento máximo acompanhando o refinamento da malha.

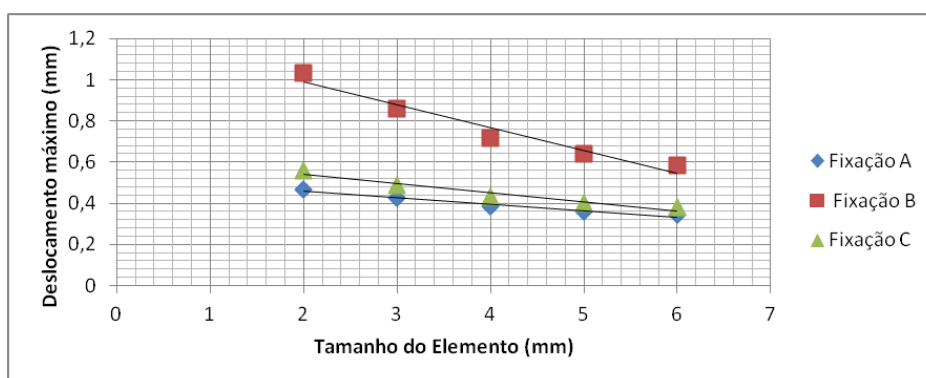


Figura 7.20 - Deslocamento máximo com elementos “*draft*”

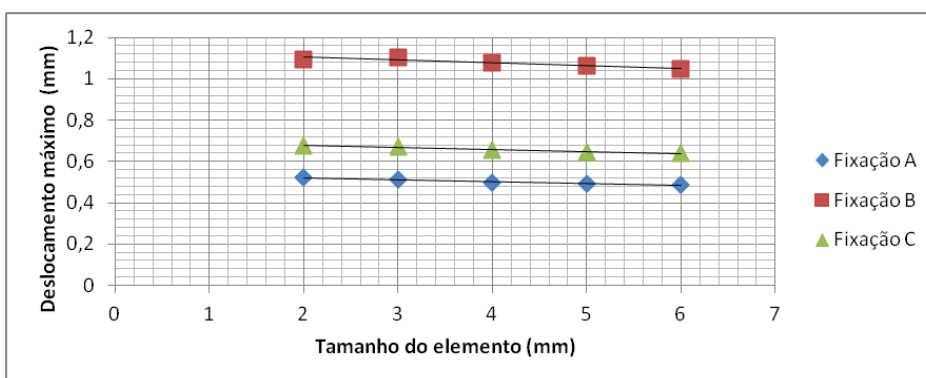


Figura 7.21 - Deslocamento máximo com elementos “*high*”

#### 7.2.3.2.9 Conclusões da análise estrutural

Pode concluir-se que, adotando um qualquer dos modelos, com elementos mistos, com elementos “*draft*” ou com elementos “*high*”, a diferença nos valores dos resultados finais é significativa. Existem diferenças consideráveis para as tensões máximas, com os valores dos ensaios com elementos “*high*” a superarem, em alguns casos, mais do dobro dos valores dos ensaios com elementos “*draft*” para o mesmo tamanho de elemento.

Após a análise da reação do chassi às solicitações consoante o tipo de fixação, conclui-se que a Fixação A é a que garante tensões máximas inferiores, assim como os deslocamentos máximos inferiores.

Observe-se que quando o chassi está fixado pelos furos dos cantos, Fixação B, a tensão máxima a que estrutura está sujeita, assim como os deslocamentos máximos que a estrutura sofre, são os mais elevados. Para o caso particular com esta fixação, para elementos “*high*” com tamanho de 4 mm, a tensão de cedência atinge um valor de 25,803 MPa e um deslocamento máximo de 1,076 mm. Revelando-se estes os piores resultados de todos os ensaios, conclui-se que não é aconselhável fixar o chassi de suporte do servomotor e da placa de controlo no banco de ensaio fotométrico do LFR com este tipo de fixação.

Quando o chassi possui uma Fixação C os valores da tensão a que este está sujeito são muitos aproximados às tensões máximas da Fixação A. Sendo assim, uma vez que a fixação do tipo C reduz significativamente o tempo de montagem do chassi no banco fotométrico (12 para 6 parafusos), e a tensões máximas sofridas pela estrutura não registam alterações significativas, este é o tipo de fixação recomendado. Nas figuras seguintes observa-se o comportamento do chassi para um elemento “*high*” com tamanho de 2 mm, para uma fixação do tipo C. Na Figura 7.22 verifica-se que a tensão máxima a que este está sujeito situa-se na zona onde o servomotor se fixa à estrutura.

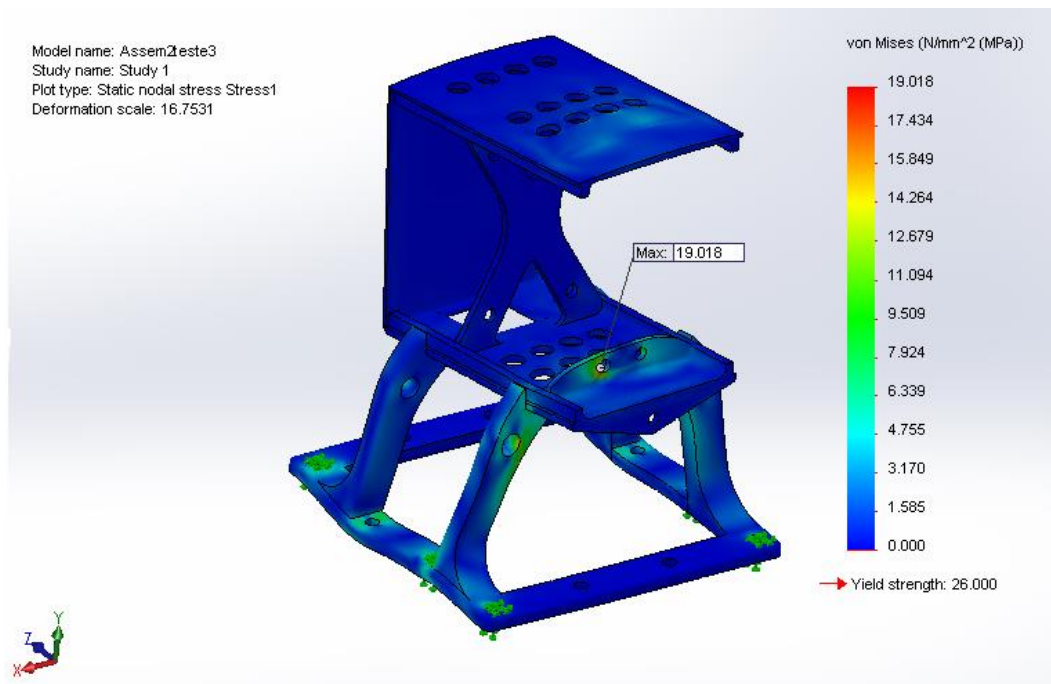


Figura 7.22 - Tensão máxima do chassi

Na Figura 7.23 verifica-se que o deslocamento máximo que a estrutura sofre está numa das suas extremidades.

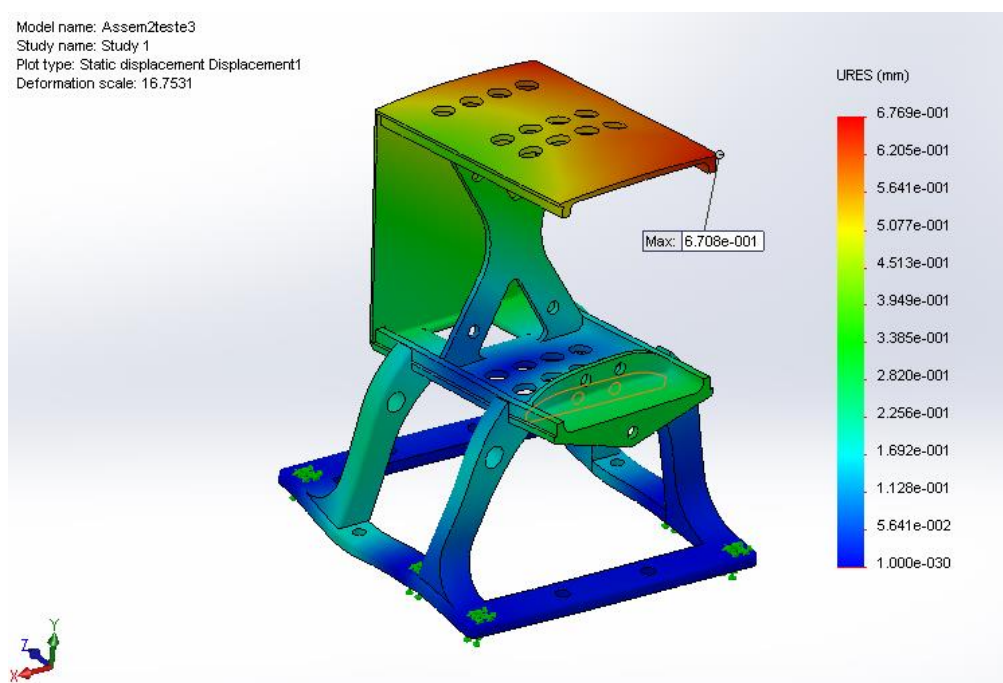


Figura 7.23 - Deslocamento máximo do chassi

#### 7.2.4 Ficheiro em formato *STL*

Em todos os processos de impressão 3D recorre-se a um modelo *CAD* 3D que é convertido em um ficheiro *STL* (*Stereolithographic Tessellation Language*). O ficheiro *STL* ao ser introduzido no equipamento de impressão 3D é convertido em um ficheiro, através do programa informático da máquina, que divide o modelo nas várias camadas de construção [39].

É importante determinar os requisitos necessários à geração de ficheiros *STL* de qualidade, uma vez que estes têm influência na qualidade das peças impressas. Numa representação de modelos tridimensionais no formato *STL* têm-se a união de tetraedros que se relacionam entre si e geram uma aproximação do sólido original. Na representação *STL* de sólidos simples, todas as superfícies de limite são planas e as faces triangulares representam exatamente o objeto, já para modelos com superfícies curvas a representação em *STL* pode apenas gerar uma aproximação. Um arquivo *STL* é definido em dois formatos, no formato *ASCII* e no formato binário. No formato binário, os pontos são representados por números inteiros e flutuantes de quatro bytes [40]. Dois outros parâmetros que definem a resolução do ficheiro gerado são o desvio linear e o desvio angular.

De forma a tornar a impressão mais eficiente foi feita uma refinação da malha *STL*, garantindo a qualidade da peça impressa, tendo em conta que quanto maior a resolução do ficheiro maior a sua dimensão, o que pode levar a um variado conjunto de problemas associados à capacidade de processamento do equipamento computacional onde estes são gerados. Sendo assim, no primeiro parâmetro de escolha, no que respeita ao formato do ficheiro a gerar, optou-se pelo formato em binário, uma vez que para o mesmo, número de elementos, desvio linear e desvio angular, os ficheiros gerados em *ASCII* apresentavam uma dimensão cinco vezes superiores face aos ficheiros gerados em binário. Nos outros parâmetros essenciais é possível gerar 3 tipos de ficheiros *STL* com resolução diferente, qualidade grosseira, fina e superfina. Segundo os resultados experimentais num estudo efetuado por João Rodrigues sobre “Influência do Ficheiro *STL* na Obtenção de Modelos Tridimensionais” [41], tornou-se evidente que o ficheiro de resolução fina do *STL* apresentou globalmente melhores resultados, registando um maior número de elementos geométricos e dimensionais dentro dos limites de tolerância estabelecidos. Como tal, foram gerados 3 ficheiros *STL* com resolução fina para cada componente que constitui o chassi. Na Tabela 24, que se segue, encontram-se as características dos ficheiros *STL* gerados e na Figura 7.24 o aspeto dos modelos *STL* gerados.

Tabela 24 - Ficheiros *STL* gerados

Peça	Estrutura 1 (tampa)	Estrutura 2 (base)	Estrutura 3 (fixação)
Formato	Binário	Binário	Binário
Desvio linear mínimo / mm	0.04788057	0,04787868	0.05543827
Desvio angular máximo / °	10	10	10
Nº de triângulos	1742	6390	6126
Tamanho do ficheiro / bytes	87184	319584	306384

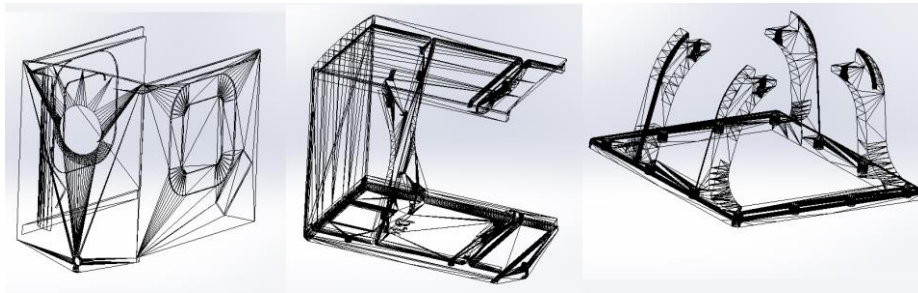


Figura 7.24 - Aspeto dos modelos *STL* gerados

### 7.2.5 Fabrico do protótipo

A impressora 3D escolhida para fabricar o protótipo de uma peça do chassi de suporte foi uma *Reprap* (Rapid Replicating Prototyper). A *Reprap*, Figura 7.25, é um projeto *open source* que começou a ser desenvolvido em meados de 2006 por *Adrian Bowyer* na Universidade de *Bath*, no Reino Unido, numa iniciativa para construir uma impressora 3D capaz de imprimir os seus próprios componentes.

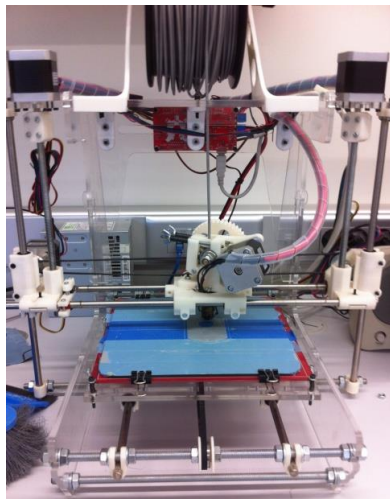


Figura 7.25 – *Reprap*

Esta impressora é controlada por um programa informático que utiliza um código de linguagem de programação denominado código-G. Atualmente, existem várias aplicações *open source* que

incorporam o elemento de geração deste tipo de programação dentro de uma interface de usuário amigável. O programa informático utilizado para a produção do protótipo do chassi foi o *Blender*, que importou o ficheiro *STL* gerado do *SolidWorks*.

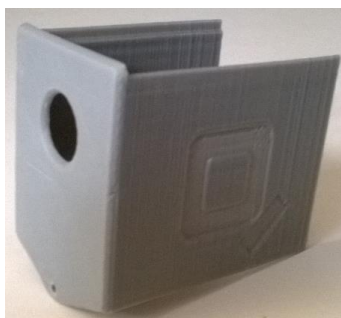


Figura 7.26 - Peça protótipo

Após o fabrico de uma peça protótipo, Figura 7.26, foram efetuadas algumas alterações no projeto inicial. Houve um reforço em alguns locais da peça, onde esta apresentava fragilidades não esperadas. Depois de efetuadas as alterações, deu-se início ao fabrico das peças que constituem o chassi final.

#### 7.2.6 Fabrico dos componentes do chassi final

Para a produção do chassi utilizou-se uma *Dimension Elite* da *Strasys*, Figura 7.27. Esta impressora é ideal para a impressão de maquetes 3D e peças complexas de modelos funcionais, tais como dispositivos médicos ou instrumentos de precisão. O material impresso é um termoplástico, *ABS-Plus*, que garante uma impressão de primeira qualidade com resistência suficiente de modo que permite que a peça impressa seja usada como peça de trabalho [42], contrariamente a uma peça impressa por uma *Reprap*.



Figura 7.27 - *Dimension Elite*



1. *Journal of the American Medical Association*, 1997; 277: 1033-1036.



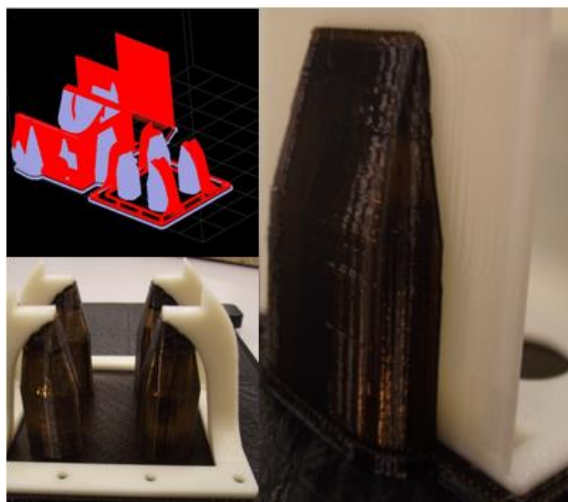


Figura 7.29 - Material de suporte

Este material, possuindo uma resistência muito reduzida, pode ser removido à mão, com o auxílio de um alicate ou outro tipo de ferramentas similar.

### 7.3 Fabrico do Acessório que Impede a Passagem de Luz

Para o fabrico da peça que se liga ao eixo de saída do servomotor e impede a passagem de luz no orifício que se encontra no banco fotométrico do LFR, recorreu-se a uma chapa em alumínio com 1 mm. O seu dimensionamento foi efetuado em *SolidWorks*, Figura 7.30. O seu fabrico foi efetuado nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) na Faculdade de Ciências e Tecnologias (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL). A peça deve ser leve, o que se constitui como requisito do seu fabrico, permitindo aliviar o torque necessário para o seu deslocamento e garantir que não ocorre passagem de luz.

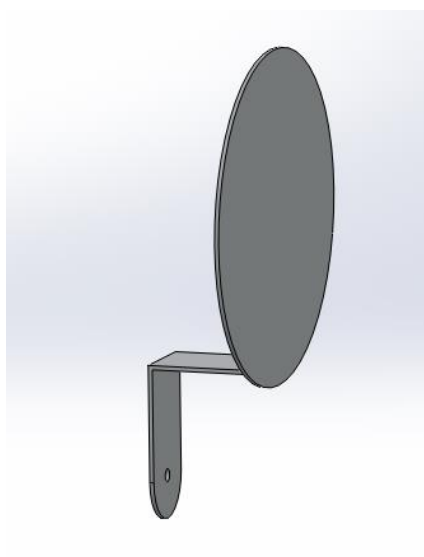


Figura 7.30 – Acessório

## 7.4 Conclusão

Impressas as peças que constituem o chassi de suporte do servomotor e da placa de controlo, constatou-se que estas apresentavam algumas irregularidades na superfície (irregularidades nas superfícies curvas e irregularidades associadas às linhas visíveis). Este conjunto de irregularidades é um defeito de construção normalmente associado ao processo de impressão *FDM*, sendo diretamente proporcional à espessura das camadas [43]. Esse efeito pode ser visualizado nas peças impressas do chassi, como ilustra a Figura 7.31. No entanto, dado que o material habitualmente utilizado nos processos de impressão 3D tem uma dureza reduzida, podem atenuar-se facilmente as irregularidades na superfície das peças acabadas através de operações de acabamento realizadas posteriormente [43].

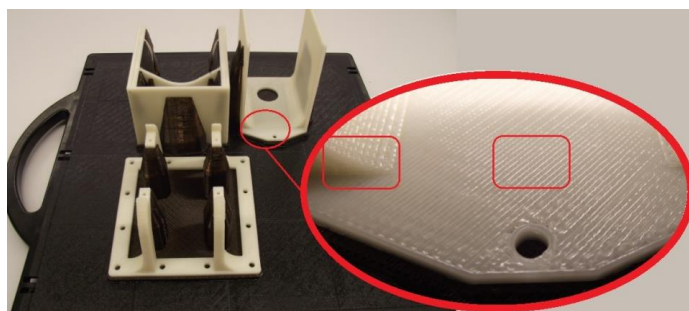


Figura 7.31 - Irregularidades das peças impressas

Para atenuar estas irregularidades, utilizou-se um método químico que consiste em colocar as peças num banho de acetona durante um espaço de tempo controlado e reduzido. As peças são então rapidamente removidas e lavadas com água destilada para remover a acetona e cessar o seu efeito químico. Este método é perigoso para a peça e não recomendado para peças de geometrias complexas ou com uma espessura muito reduzida, uma vez que a acetona é um químico que possui uma reação muito forte sobre termoplásticos e existe o risco de ficar retida em certas zonas da peça durante um período de tempo superior ao recomendado, causando deformação grave na superfície.

Apesar destas irregularidades o resultado da peça final, Figura 7.32 foi muito satisfatório. A peça final apresentou um aceitável rigor dimensional e elevada resistência.

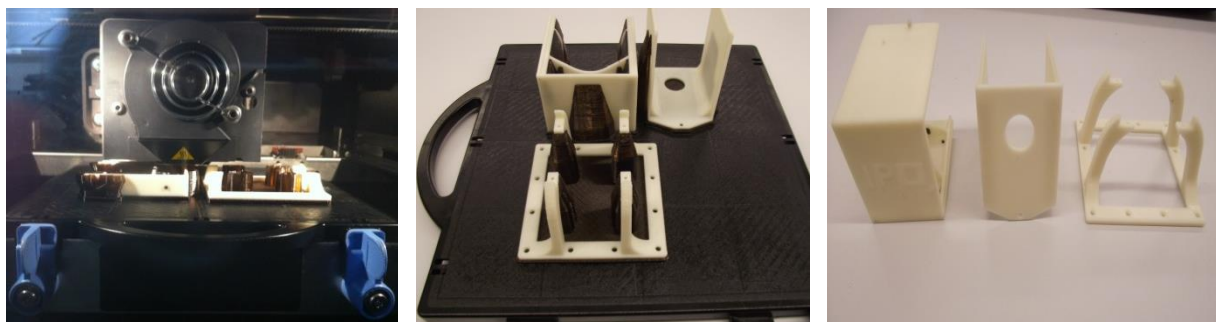


Figura 7.32 - Resultado da peça final



## 8 Programação em LabVIEW

Como para todos os sistemas informatizados, a escolha da linguagem de programação depende da finalidade e complexidade da aplicação. A vantagem de uma interface gráfica de programação está no facto de não ser necessário que o programador do sistema de instrumentação tenha conhecimentos avançados de programação, que são necessários numa linguagem de programação genérica, uma vez que fornece uma linguagem de programação flexível e com funcionalidades e configurações específicas ideal para o desenvolvimento de qualquer sistema de medição ou controle.

Integrando todas as ferramentas de que os engenheiros e cientistas precisam para desenvolver uma ampla gama de aplicações em um tempo significativamente menor, o LabVIEW é um ambiente de desenvolvimento voltado à resolução de problemas, produtividade acelerada e inovação contínua [44].

### 8.1 Definição do Problema

Pretende-se que o automatismo composto pelo servomotor e pela placa de controlo associada, tenha a capacidade de realizar a movimentação do acessório que impende a passagem de luz no banco fotométrico através do seu deslocamento angular até um valor nominal.

Um dos requisitos para a construção do sistema de controlo neste projeto era a utilização do LabVIEW num computador remoto associado, uma vez que é o programa informático que atualmente efetua a recolha de dados no processo de calibração de lâmpadas e luxímetros onde o automatismo será aplicado. O LabVIEW é um programa informático de instrumentação virtual desenvolvido pela *National Instruments (NI)*.

A linguagem de programação gráfica LabVIEW, acrónimo de “*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*”, da *National Instruments (NI)*, foi criada em 1986 para o microcomputador *Macintosh*. Atualmente o LabVIEW esta disponível para várias plataformas computacionais.

### 8.2 Ambiente de Programação

Um programa desenvolvido com o LabVIEW é composto por dois componentes, um diagrama de blocos, que corresponde às linhas de código do programa, e o painel frontal, que permite a interação do usuário com o instrumento virtual, onde para se criar aplicações são utilizados ícones. Este método distingue-se das linguagens de programação tradicionais uma vez que estas utilizam linhas de código que determinam a execução do programa ao contrário do LabVIEW que utiliza o fluxo de dados para determinar a execução, esse diferença entre estilos de programação é ilustrada na Figura 8.1 abaixo.

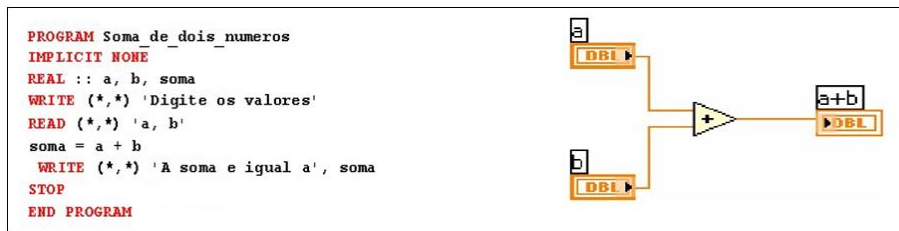


Figura 8.1 - À esquerda programação com linhas de comando e à direita através de ícones

Os programas em LabVIEW são denominados Instrumentos Virtuais (VI), uma vez que a sua aparência tem o mesmo aspeto visual que os instrumentos físicos, como por exemplo multímetros. Cada VI tem funções que manipulam a entrada pela interface do usuário ou de outras fontes e indicam essa informação ou a movem para outros arquivos ou outros computadores. Cada VI possui entradas e saídas. A execução de um VI começa quando todas as entradas estão “preenchidas”. Todos os VIs baseiam-se numa serie de funções básicas que não podem ser abertas ou modificada. A maior parte dos VIs são polimorfos, ou seja, a sua funcionalidade adapta-se ao tipo de dados que recebem.

Existem no entanto algumas desvantagens deste tipo de linguagem face à programação em texto. Por exemplo quando efetuamos pequenas alterações, é necessário uma nova reestruturação do programa, pois quando se cria um novo “lugar” é necessário conectar os blocos de novo, de forma a restabelecer o sistema. Para evitar confusões causadas pelo excesso de ligações entre blocos (arames) é frequente introduzir mais variáveis que o necessário, o que reduz a velocidade de processamento e contraria o modelo *data-flow*.

### 8.2.1 Painel frontal

Na Figura 8.2, que se segue, ilustra-se o aspeto do painel frontal que é a interface do LabVIEW com o utilizador.

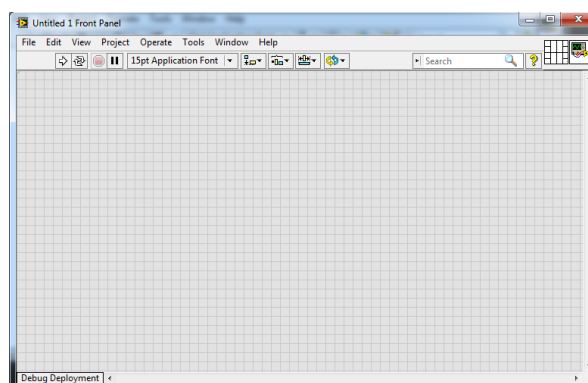


Figura 8.2 - Painel frontal

O painel frontal é construído com controlos e indicadores, que são os terminais interativos de entrada e de saída do VI, respetivamente. No painel frontal existe o menu dos controlos (*Controls*), Figura 8.3 abaixo. Os controlos são dispositivos de entrada, como botões, teclas, entre outros. Os indicadores são gráficos, *LED*, ou seja, é a saída de informações. Os controlos simulam dispositivos de entrada do instrumento e de dados da fonte do diagrama de bloco do VI. Os indicadores simulam dispositivos de saída do instrumento e visualiza dados que o diagrama de bloco adquire ou gera [45].

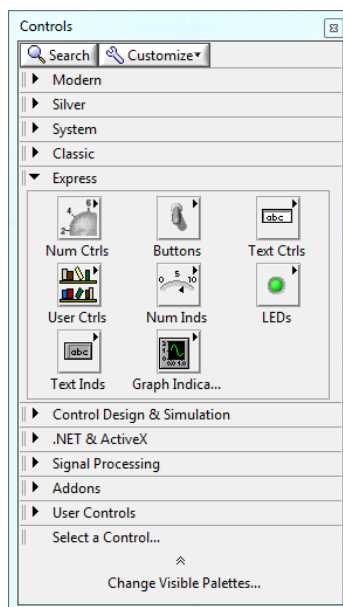


Figura 8.3 - Menu de controlos

Cada painel frontal possui um diagrama de blocos correspondente, o qual traduz o programa de VI.

### 8.2.2 Diagrama de blocos

Depois de definir o painel frontal, adiciona-se código usando representações gráficas de funções para controlar os objetos no painel [46]. O painel frontal contém o código fonte em linguagem gráfica que define o funcionamento do VI.

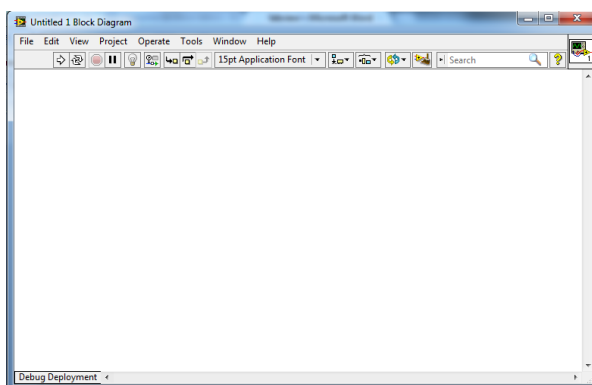


Figura 8.4 - Diagrama de blocos

Os componentes do diagrama de blocos, Figura 8.4, constituem os nós do programa. Cada opção do menu de funções, Figura 8.5, abre um submenu acessível através de um ícone.

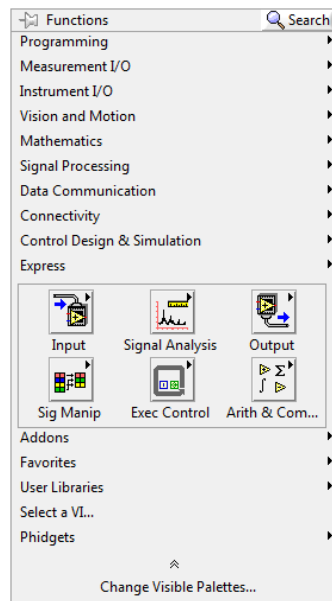


Figura 8.5 - Menu de funções

### 8.2.3 Conector de blocos

O LabVIEW segue um modelo de fluxo de dados para correr *VI*. Um nó do diagrama de bloco é executado quando todas as suas entradas estão preenchidas [46]. Quando um nó completo a execução, fornece dados aos seus terminais de saída e passa-os ao próximo nó no caminho de fluxo que constitui outro *VI*.

## 8.3 Método de Desenvolvimento do Programa em LabVIEW

A principal vantagem na utilização da placa de controlo da *Phidgets* para controlar o servomotor é pelo facto de este *hardware* poder ser programável com recurso à linguagem de programação da LabVIEW. Esta interação é efetuada a partir de uma livreria disponibilizada pela *Phidget* que disponibiliza um vasto leque de *VI*'s com códigos fonte e rotinas desenvolvidas especificamente para o controlo de servomotores podendo ser utilizadas diretamente na placa de controlo programável da *Phidgets*.

No subcapítulo que se segue, irá ser descrito o processo de programação da placa de controlo do servomotor. Numa primeira fase um programa que permite calibrar o servomotor e numa segunda fase um programa para controlar a passagem de luz no banco fotométrico do LFR. Para tal teve-se como referência o *LabVIEW Manual* [47]. Segundo este manual, as placas de controlo *Phidgets*, podem ser programadas seguindo 3 etapas.

1º Etapa: Iniciar a placa de controlo *Phidget*, ou seja aceder ao *hardware*, que permite o acesso às funcionalidades da placa de controlo, Figura 8.6.

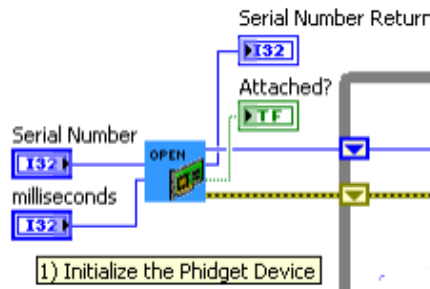


Figura 8.6 - *Open Phidget*

2º Etapa: Executar as funcionalidades pretendidas, que se podem encontrar na livraria da *Phidgets* no LabVIEW, Figura 8.7.

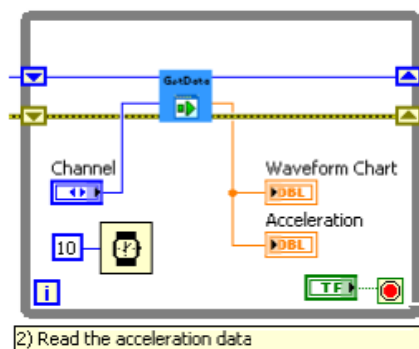


Figura 8.7 - *Event execution*

3º Etapa: Encerrar o acesso à placa *Phidget*, Figura 8.8 abaixo.

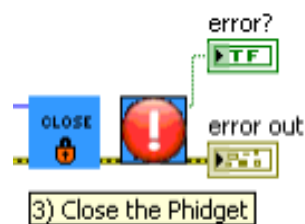


Figura 8.8 - *ClosePhidget.vi*

### 8.3.1 Programa em LabVIEW para calibrar o servomotor

Efetuuou-se um programa em LabVIEW para saber a posição real do servomotor quando lhe é fornecida uma ordem para o posicionamento angular. Como tal utilizou-se o próprio programa da



*Phidgets* para controlo manual do servomotor, Figura 8.9. Sendo assim, executou-se uma ordem ao servo para adquirir a posição de zero graus, de seguida comparou-se com uma ordem igual mas no programa efetuado em LabVIEW e ainda com a posição angular real do servomotor.

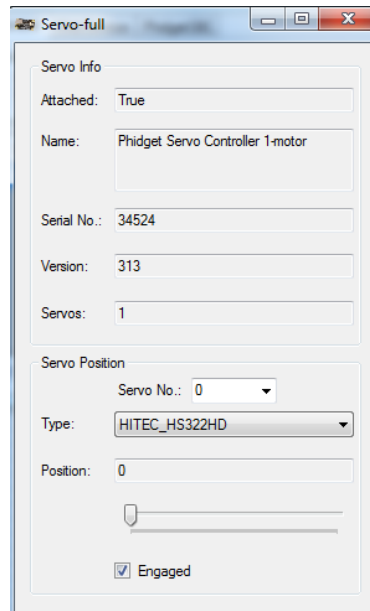


Figura 8.9 - Interface do programa informático da *Phidgets*

Para a execução do programa, para saber a posição angular do servomotor em LabVIEW, seguiram-se as seguintes etapas. Numa primeira etapa então adicionou-se um sub-VI que permite o acesso à placa de controlo, *PhidgetOpen* Figura 8.10 abaixo.

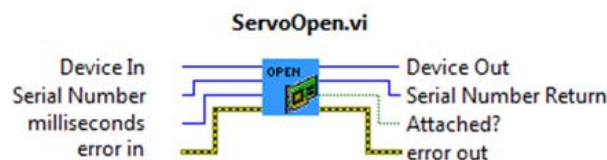


Figura 8.10 - *PhidgetOpen.vi*

Neste VI temos os seguintes parâmetros de entrada, para o programa correr sem erros todos os parâmetros de entrada devem estar preenchidos e com valores corretos:

- *Device in*: É endereço do dispositivo no computador, quando assume o valor de “0” o *ServoOpen* ira criar uma nova identificação para o servomotor.
- *Serial number*: Neste *input* podia-se ter posto o número de serie do servomotor, mas para o programa poder abrir qualquer servomotor definiu-se este parâmetro o valor de -1.

- *Miliseconds*: Tempo de espera para conexão, definiu-se este parâmetro com o valor de “0” para o tempo de espera ser infinito.
- *Error in*: Descreve a condições de erro de entrada.

E os seguintes parâmetros de saída:

- *Device out*: Identificação do dispositivo, que será igual ao *Device in*.
- *Serial number return*: Este *output* fornece o número de serie do servomotor.
- *Attached*: Confirma se o servomotor esta, ou não, conectado.
- *Error out*: Contem, se existir, informações do erro.

Em seguida adicionou-se um sub-VI, *ServoCount*, ilustrado na Figura 8.11 abaixo.

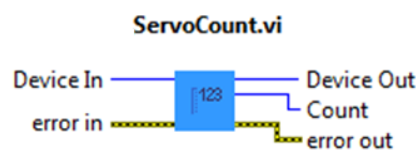


Figura 8.11 - *ServoCount.vi*

Parâmetros de entrada:

- *Device in*: É endereço do dispositivo no computador, que é a mesma que o *OpenPidget* criou.
- *Error in*: Descreve a condições de erro de entrada, igual ao *Error out* que o *OpenPhidget* criou.

E os seguintes parâmetros de saída:

- *Device out*: É endereço do dispositivo no computador, que será igual ao *Device in*.
- *Count*: Fornece o número de servomotores que a placa de controlo suporta.
- *Error out*: Contem, se existir, informações do erro.

De seguida iniciou-se um ciclo *While Loop*, ilustrado na Figura 8.12. Este tipo de estrutura tem a função de repetir o subdiagrama que possui dentro das suas fronteiras até ter ordem de parar. No caso deste programa em questão, a ordem para parar o *While Loop*, é um botão de paragem no painel frontal.



Figura 8.12 - *While loop*

Dentro da estrutura referida em cima foi inserida um sub-VI, *ServoGetPos*. Este sub-VI, ilustrado na Figura 8.13, tem como função receber a posição real da posição do servomotor.

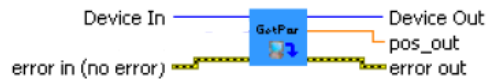


Figura 8.13 - *ServoGetPos.vi*

Parâmetros de entrada:

- *Device in*: É endereço do dispositivo no computador, que é a mesma do *ServoCount*.
- *Error in*: Descreve a condições de erro de entrada, igual ao *Error out* que o *OpenPhidget* criou.

Parâmetros de saída:

- *Device out*: É endereço do dispositivo no computador, que será igual ao *Device in*.
- *Pos\_out*: Fornece o valor de saída, em graus, da posição real do servomotor.
- *Error out*: Contem, se existir, informações do erro.

Se na primeira fase se inicia o acesso à placa de controlo, nesta fase cessa-se esse acesso. Para tal existe um sub-VI, *PidgetClose*, que encerra a conexão à placa de controlo, ilustrado na Figura 8.14 seguinte.



Figura 8.14 - *ClosePhidget.vi*

Parâmetros de entrada:

- *Device in*: É endereço do dispositivo no computador, que é a mesma que o *OpenPidget* criou.
- *Error in*: Descreve a condições de erro de entrada, igual ao *Error out* que o *OpenPhidget* criou.

Parâmetros de saída:

- *Device out*: É endereço do dispositivo no computador, que será igual ao *Device in*.
- *Count*: Fornece o número de servomotores que a placa de controlo suporta.
- *Error out*: Contem, se existir, informações do erro.

Na Figura 8.15, ilustra-se o aspeto do programa no diagrama de blocos em linguagem LabVIEW que permite saber a posição angular do servomotor. Na Figura 8.16 ilustra-se o painel frontal do programa em questão.

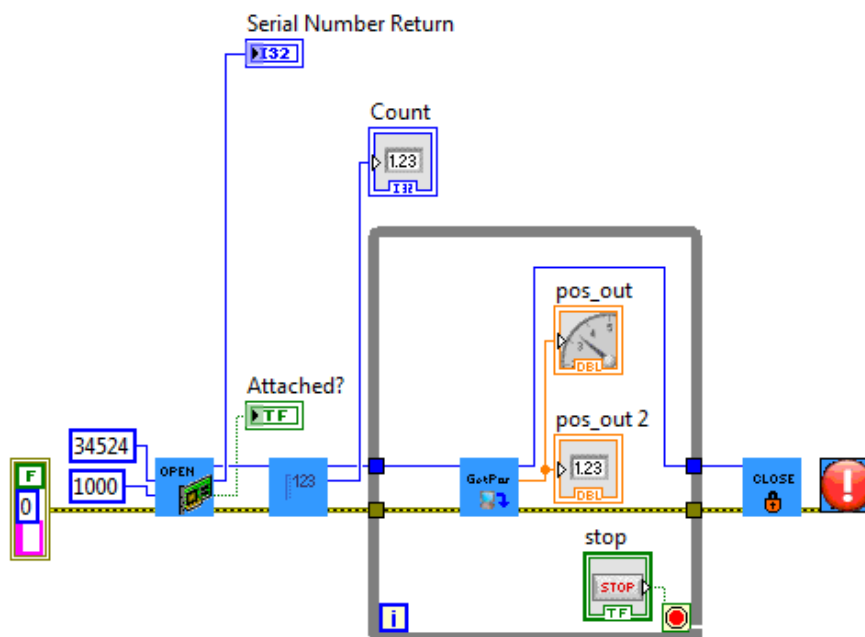


Figura 8.15 - Diagrama de blocos do programa para calibrar o servo

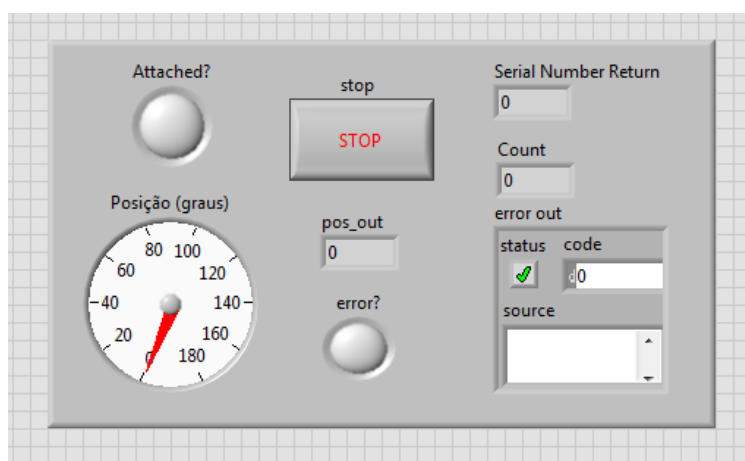


Figura 8.16 - Painel frontal do programa para calibrar o servomotor

De seguida verificou-se com os dois programas, ou seja, deu-se uma ordem, utilizando o programa manual que a *Phidgets* fornece para controlar o servomotor, de zero graus, por exemplo, depois correu-se o programa em LabVIEW e verificou-se a posição que o programa indicava. Após verificar esta discordância entre os dois programas ainda se verificou que estes dois diferiam também da posição real do servomotor. Deste modo conseguiu-se averiguar e calibrar utilizando o programa em

LabVIEW para estar em concordância com a posição angular real do servomotor. Na Tabela 25, encontram-se os resultados dessa calibração, com intervalos de 45 graus.

Tabela 25- Comparação dos resultados

Posição real do servomotor	LabVIEW	<i>Phidget Control Panel</i>
0°	29,88°	-7,18°
45°	73,66°	42,96°
90°	110,41°	81,83°
135°	155,03°	135,96°
180°	193,56°	177,75°

Averiguou-se que, contrariamente às especificações fornecidas pelo fabricante do servomotor, que este não possui um intervalo de funcionamento de  $[0^\circ; 180^\circ]$  e sim de  $[0^\circ; \approx 164^\circ]$  utilizando o programa de LabVIEW e de  $[0^\circ; \approx 185^\circ]$  utilizando o programa da *Phidgets*. Não se chegou a nenhuma conclusão em relação à origem desta diferença de resultados, mas poderá ocorrer por este servomotor funcionar numa gama de 600  $\mu$ s para zero graus e de 2400  $\mu$ s para 180°, e a placa de controlo da *Phidget* e/ou o LabVIEW não conseguirem um sinal *PWM* com a largura de 2400  $\mu$ s. É importante frisar que apesar desta diferença de resultados, após a calibração do servo, este ficou a operar entre  $[0^\circ; 180^\circ]$ , que era a gama de valores pretendida.

### 8.3.2 Programa em LabVIEW de controlo posicional do servomotor

Neste subcapítulo descreve-se o processo de programação do servomotor em LabVIEW que controla a passagem de luz no processo de calibração de lâmpadas e luxímetros no LFR do IPQ.

A filosofia da programação em LabVIEW consiste em decompor o programa principal em vários subprogramas, chamados sub-VI's, em que cada sub-VI tem uma função. Como tal o programa em LabVIEW que irá controlar o servomotor que controla a passagem de luz no banco fotométrico do LFR do IPQ será um sub-VI que irá ser adicionado ao VI principal que atualmente recolhe os dados para calibração de lâmpadas e luxímetros. Devido a sua grande extensão, na Figura 8.17 é apresentado uma parte do programa de recolha de dados para a calibração de lâmpadas e luxímetros onde o programa de controlo do servomotor será inserido.

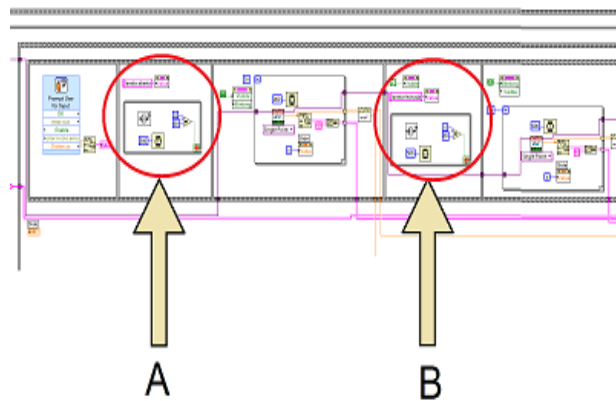


Figura 8.17 – Secção do programa de recolha de dados para a calibração de lâmpadas e luxímetros, em LabVIEW.

Como ilustrado na Figura acima, o programa efetuado em LabVIEW para controlar o servomotor irá ser implementado no programa existente de recolha de dados. Esse programa original possui um conjunto de secções no programa raiz, a secção A (quando o servomotor está na posição que permite a passagem de luz) e B (quando o servomotor adquire a posição que não permite a passagem de luz). Durante o processo de recolha de dados, o programa emite um sinal sonoro durante 60 segundos para o operador ir tapar o orifício para dar início a outra sequência de medições. Na Figura 8.18, ilustrar-se-á um exemplo referente a parte A da Figura 8.17.

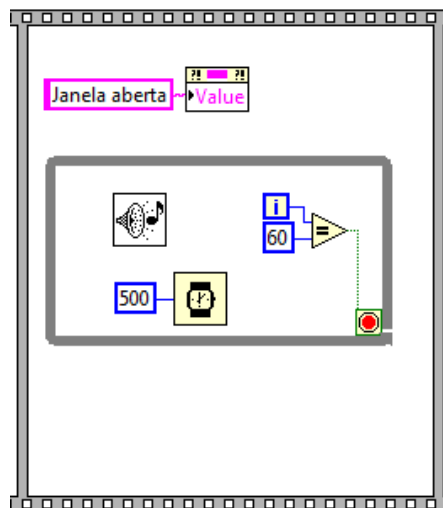


Figura 8.18 - A: Parte do programa original que emite sinal sonoro para o operador destapar o orifício.

Para a execução do programa controlar o servomotor em LabVIEW, seguiu-se, numa primeira fase, o mesmo processo do programa anteriormente efetuado para calibrar o servomotor. Numa primeira etapa então criou-se um sub-VI que permite o acesso à placa de controlo, *PhidgetOpen*. Em seguida adicionou-se um sub-VI, *ServoCount*. De seguida iniciou-se uma estrutura, *Flat Sequence*, Figura 8.19

seguinte. Esta estrutura consiste num, ou mais, subdiagramas que são executados sequencialmente, desta forma, é assegurado que um subdiagrama é executado antes ou depois do subdiagrama anterior ou posterior respetivamente.

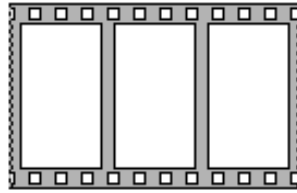


Figura 8.19 - *Flat Sequence Structure*

No primeiro subdiagrama da estrutura acima referida, foram inseridos dois sub-VI's. Um que controla o tempo de passagem para o seguinte subdiagrama da estrutura *Flat Sequence*, e outro que permite executar uma ordem de posicionamento angular no servomotor.

O sub-VI que permite executar a ordem de posicionamento angular, *ServoSetPos* ilustrado na Figura 8.20, possui os parâmetros de entrada e de saída a baixo referidos.

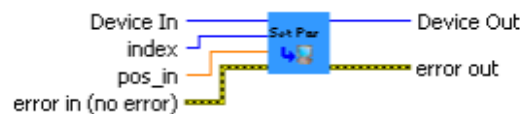


Figura 8.20 - *SetPar.vi*

Parâmetros de entrada:

- *Device in*: É a identificação do dispositivo, que é a mesma do *ServoCount*.
- *pos\_in*: Posição angular, em graus, para o servomotor se posicionar.
- *Error in*: Descreve a condições de erro de entrada.

Parâmetros de saída:

- *Device out*: Identificação do dispositivo, que será igual ao *Device in*.
- *Error out*: Contem, se existir, informações do erro.

O VI que permite controlar o tempo de passagem para o subdiagrama da estrutura, *Time Delay* ilustrado na Figura 8.21, possui os parâmetros de entrada e de saída a baixo referidos. A introdução deste *sub-VI* permite atrasar a aquisição de dados do ensaio por parte do programa principal, de modo a fornecer tempo ao servomotor de adquirir a posição final desejada.

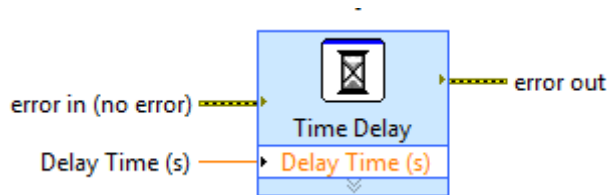


Figura 8.21 - *TimeDelay.vi*

Parâmetros de entrada:

- *Delay Time(s)* :Tempo, em segundos, que demora para executar o sub-VI. No programa em questão, 3 segundos.
- *Error in*: Descreve a condições de erro de entrada.

Parâmetros de saída:

- *Error out*: Contem, se existir, informações do erro.

No segundo subdiagrama da estrutura *Flat Sequence*, foram inseridos dois sub-VI's. Esta segunda fase do subdiagrama tem como principal intuito o controlo posicional do servomotor, de maneira a quando o eixo de saída do servomotor não se posiciona na posição desejada de parar todo o programa de aquisição de dados do LabVIEW e enviar uma mensagem de erro para o operador.

Para tal, foi inserido um sub-VI, *ServoGetPos*, igual ao utilizado no programa para calibrar o servomotor. A partir do parâmetro de saída deste sub-VI, posição real da posição angular do eixo do servomotor, foram adicionados um conjunto de operadores lógicos e de funções, que permitem avaliar o parâmetro de saída do *ServoGetPos*, e verificar se este encontra-se dentro de um intervalo de valores aceitáveis, verificado experimentalmente, para uma boa recolha de dados pelo programa principal. Se a posição do eixo do servomotor encontrar-se fora desses parâmetros, o programa encerra, e aparece uma mensagem a informar o mau funcionamento do servomotor. Este processo é conseguido por um VI, *Display Message to User*, ilustrado na Figura 8.22 abaixo.

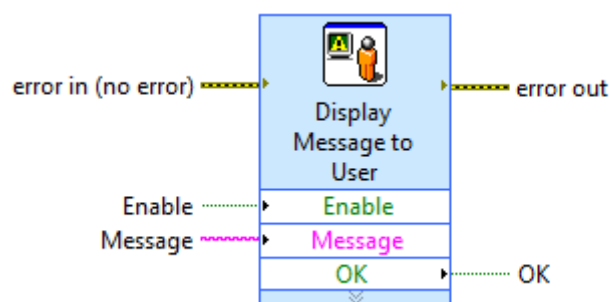


Figura 8.22 - *Display Message to Use.vi*



Parâmetros de entrada:

- *Enable* : Aciona o VI.
- *Message*: Contem a mensagem que aparece na caixa de texto quando o VI é ativado.
- *Error in*: Descreve a condições de erro de entrada.

Parâmetros de saída:

- *OK*: Ao aparecer a caixa de texto com a mensagem, e se clicar no “OK”, o programa encerra.
- *Error out*: Contem, se existir, informações do erro.

Para encerrar o programa de controlo do servomotor, adicionou-se um sub-VI, *PidgetClose*, que encerra a conexão à placa de controlo.

Na Figura 8.23, ilustra-se o aspeto do programa no diagrama de blocos em linguagem LabVIEW que permite controlar a posição angular do servomotor, quando o orifício que permite, ou não, a passagem de luz no banco fotométrico do LFR encontra-se tapado, Figura 8.24.

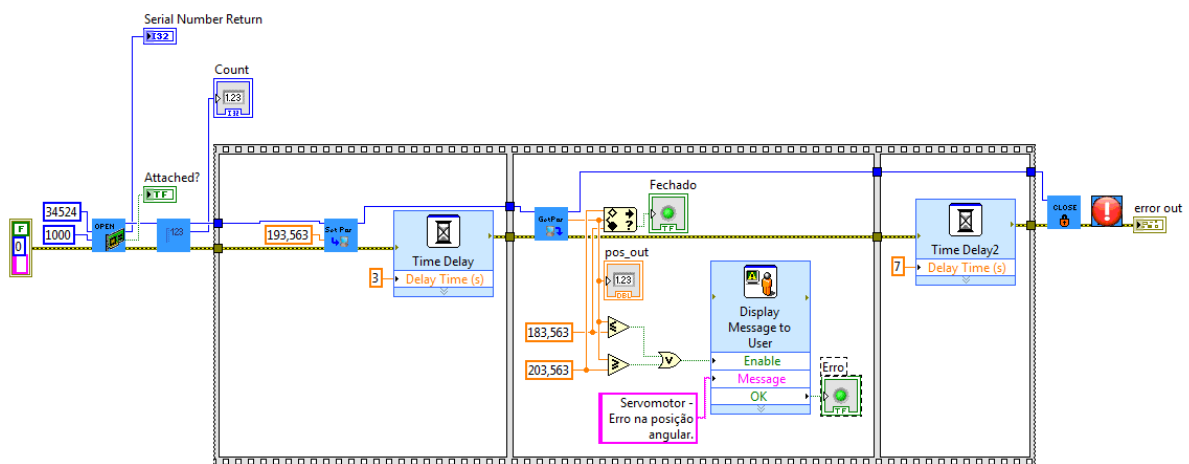


Figura 8.23 - Diagrama de blocos do programa de controlo posicional angular do servomotor

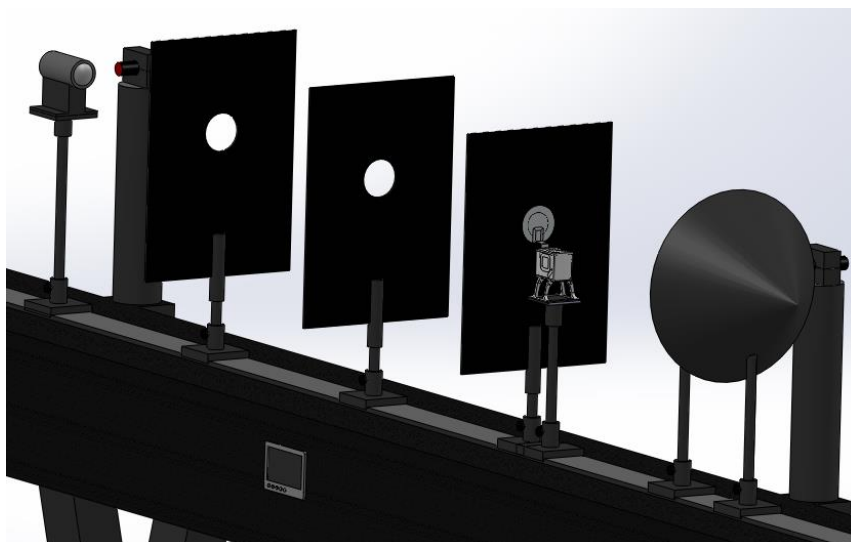


Figura 8.24 - Servomotor posicionado de maneira a não permitir a passagem de luz no banco fotométrico

Para controlar a posição angular do servomotor, quando o orifício que permite a passagem de luz no banco fotométrico do LFR encontra-se aberto, o único parâmetro que varia é parâmetro de entrada do sub-VI *ServoSetPos*, com a posição angular desejada para o efeito. Na Figura 8.25, ilustra-se o painel frontal do programa em questão.

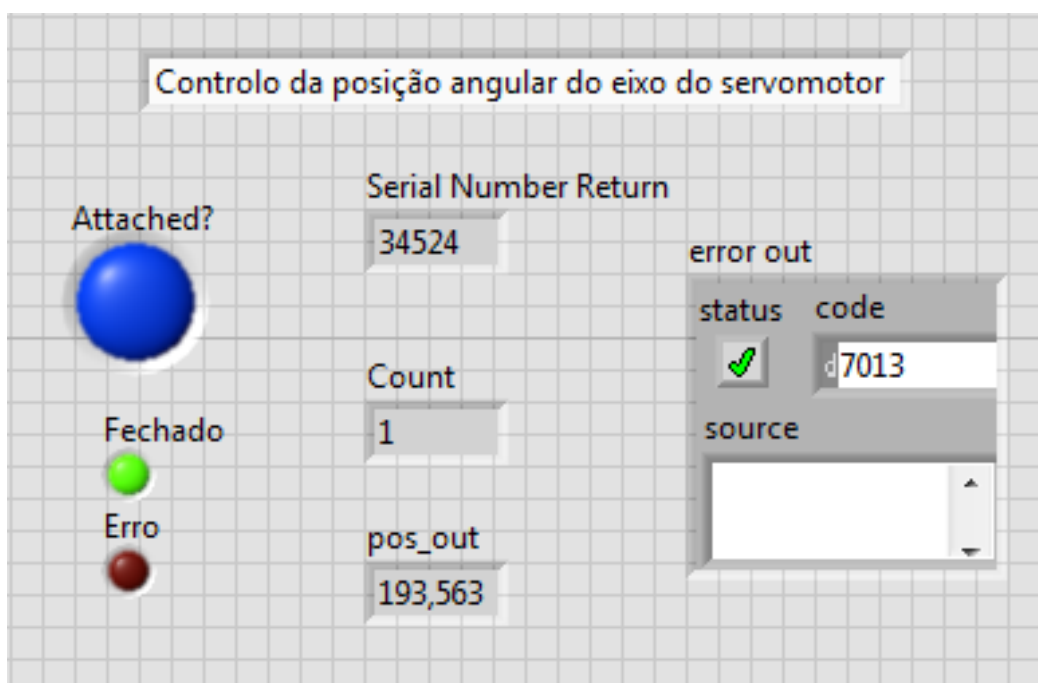


Figura 8.25 - Painel frontal do programa de controlo posicional angular do servomotor

Na Figura 8.26, interface de todo o programa, em linguagem LabVIEW, de calibração de lâmpadas e luxímetros no IPQ.



Figura 8.26 - Interface de todo o programa, em linguagem LabVIEW, de calibração de lâmpadas e luxímetros no IPQ

## 9 Análise ao Automatismo

A garantia da qualidade das medições com o automatismo implementado no LFR pode ser efetuada pela validação dos resultados de medição obtidos com este novo processo. Nesta validação, analisa-se uns parâmetros característicos dos resultados obtidos em vista de avaliar o desempenho ao novo processo. Em particular, verifica-se que os ensaios são sempre executados da mesma maneira, diminuindo potenciais fontes de variabilidade, como a incerteza associada ao operador. Utilizou-se um conjunto de ferramentas de análise, desde a avaliação do erro relativo de medições, comparação das ordens de grandezas das incertezas expandidas, erro normalizado e repetibilidade de medição.

A validação do método de utilização do automatismo é também estudada como garantia definitiva do trabalho efetuado.

### 9.1 Validação dos Resultados pelos Procedimentos

#### 9.1.1 Calibração de lâmpadas

Como referido em 4.2.2, a validação dos resultados dos ensaios de calibração de lâmpadas pode ser analisada pela diferença relativa entre os valores de intensidade luminosa deduzidos dos valores da intensidade luminosas das lâmpadas primárias. Uma tal diferença inferior a 0,5 % é uma validação dos resultados.

Com o modo objetivo de validar os resultados de medição com a implementação do automatismo, foram efetuados ensaios em sequências de medições para 3 lâmpadas de padrão primário do LFR, Osram Wi 41 G (número de serie (NS): NS53, NS56 e NS 85), e a lâmpada a calibrar, Oriel BRL 6332, após instalação do mesmo. A obtenção dos dados experimentais do ensaio consiste em uma sequência de operações como descrito no capítulo 4.

As especificações metrológicas de cada lâmpada padrão primário utilizadas no ensaio encontram-se nas Tabela 26.

Tabela 26- Especificações metrológicas das lâmpadas padrão primário

Lâmpadas Padrão Primário	$I_R$ / cd	$\pm$	$U_{R,P}$ / cd para $k = 2$	$J_R$ / A
NS85	262,20	$\pm$	1,3	5,79
NS56	263,05	$\pm$	1,3	5,79
NS53	263,05	$\pm$	1,3	5,78

A título de exemplo, o balanço das incertezas na sequência de medições para a lâmpada padrão NS56, seguindo o procedimento do subcapítulo 4.2.2.3 para o cálculo das incertezas, segundo o tipo de

método de avaliação, os coeficientes de sensibilidade são apresentados de acordo com as expressões apresentadas no subcapítulo 4.2.2.3. Os valores do balanço de incertezas encontram-se na Tabela 27.

Tabela 27 - Balanço de incertezas da sequência de medições para a lâmpada padrão 56

<b>i</b>	<b>Grandeza, <math>X_i</math></b>	<b>Incerteza padrão, <math>u(x_i)</math></b>		<b>Tipo de avaliação</b>	<b>Número de graus de liberdade, <math>\nu_i</math></b>	<b>Coef. de sensib., <math>c_i</math></b>		<b>Contrib. a <math>u_i(y)</math> / cd</b>
<b>1</b>	$I_R$	1,32	cd	B	$\infty$	1,83E-01		2,41E-01
<b>2</b>	$V_{f,S}$	6,55E-05	mV	A	19	1,49E+02	cd/mV	9,78E-03
<b>3</b>	$V_{f,P}$	1,25E-04	mV	A	19	-2,75E+01	cd/mV	3,44E-03
<b>4</b>	$\alpha\Delta t$	3,23E-03		B	$\infty$	-4,84E+01	cd	1,56E-01
<b>5</b>	$h w(\phi)$	1,40E-05		B	$\infty$	-4,84E+01	cd	6,78E-04
<b>6</b>	$k w(\theta)$	8,17E-04		B	$\infty$	-4,84E+01	cd	3,95E-02
<b>7</b>	$c_m$	1,50E-07		B	$\infty$	3,37E+02	cd	5,06E-05
<b>8</b>	$U_{R,P1}$	3,71E-04	mV	A	19	1,72E+00	cd/mV	6,37E-04
<b>9</b>	$R_{\text{padrão}}$	1,88E-06	$\Omega$	B	$\infty$	-9,95E+03	cd/ $\Omega$	1,88E-02
<b>10</b>	$m_l$	1,44E-01		B	$\infty$	-1,75E-02		2,52E-03

Para cada sequência de ensaio, é aplicada a Equação 4.5 para calcular o valor médio da intensidade luminosa. A incerteza combinada é calculada a partir da Equação 4.6. Os resultados do ensaio, com o automatismo aplicado no LFR, encontram-se na Tabela 28 seguinte.

Tabela 28 - Resultados

Sequência	Lâmpada	$V_{f,P} / \mu V$	$V_{f,S} / \mu V$	$I_P / cd$	$I_S / cd$	$u(I_S) / cd$
1	56	1,749	-	260,91	-	0,3
	6332	-	0,323	-	48,1	
2	85	1,748	-	260,02	-	0,3
	6332	-	0,323	-	48,0	
3	53	1,751	-	261,4	-	0,3
	6332	-	0,323	-	48,2	

Pela aplicação da Equação 4.7 e da Equação 4.8, para as três sequências de medições, o valor da intensidade luminosa da lâmpada a calibrar, e da incerteza combinada associada, encontram-se na Tabela 29 seguinte.

Tabela 29 – Intensidade da lâmpada a calibrar

Lâmpada	$I / cd$	$u(I) / cd$
6332	48,1	0,3

A diferença relativa entre os três valores de intensidade luminosa deduzidos dos valores da intensidade luminosas das lâmpadas primárias e a o valor da intensidade da lâmpada a calibra encontram-se na seguinte.

Tabela 30 - Diferença relativa

$\Delta (I_{s,n}) \% (I)$
0,25

Da Tabela 30, uma vez que o valor da diferença relativa é inferior a 0,5 % pode-se concluir a validação dos resultados para a calibração de intensidade luminosa, após a implementação do automatismo

### 9.1.2 Calibração de luxímetros

A validação dos resultados no processo de calibração de luxímetros consiste na comparação das ordens de grandezas das incertezas expandidas, associadas aos valores de referência de iluminância, com as incertezas expandidas de intensidade luminosa das lâmpadas de trabalho.

Foram efetuadas medições com o automatismo aplicado no banco fotométrico do LFR, para três lâmpadas de trabalho, modelos 6332, 6334 e 6315 da Oriel. Nestas sequências, a iluminância é medida pelo luxímetro, para duas distâncias,  $D_{\text{lamp-luxi}}$ , para cada lâmpada.

As especificações metrológicas das lâmpadas de trabalho encontram-se na Tabela 31 seguinte.

Tabela 31 - Especificações metrológicas das lâmpadas de trabalho

Lâmpadas de trabalho	$I_v$ / cd	$\pm$	$U(I_v)$ / cd para $k = 2$	$J / A$
6332	49,0	$\pm$	0,6	3,434
6334	221,8	$\pm$	2,7	8,140
6315	938	$\pm$	11	7,118

A título de exemplo, o balanço de incertezas da sequência de medições para a lâmpada de trabalho Oriel 6332 a uma distância de 3,2 m do plano do luxímetro, a partir do procedimento do subcapítulo 4.2.3.3, encontram-se na Tabela 32 abaixo.

Tabela 32 - Balanço de incertezas da sequência de medições para a lâmpada de trabalho 6332

i	Grandeza, $X_i$	Incerteza padrão, $u(x_i)$	Tipo de avaliação	Grau de liberdade, $\nu_i$	Coef. de sensib., $c_i$	Contrib. a $u_i(y)$ / cd
1	$E_{\text{luxi}}$	3,06E-02 lx	A + B	19	1	3,06E-02
2	$I_{\text{ref}}$	2,95E-01 cd	B	50	-0,11 cd/lx	3,14E-02
3	$D_{\text{lamp-luxi}}$	5,00E-05 m	A + B	50	-3,40 m/lx	1,70E-04
4	$\varepsilon$	7,84E-05 m	A + B	50	-3,40 m/lx	2,66E-04

O resultado do erro sobre a iluminância lida pelo luxímetro em calibração em relação ao valor referência da iluminância para cada lâmpada de trabalho com o automatismo aplicado no LFR para cada lâmpada de trabalho é calculado aplicando a Equação 4.12. Esses resultados encontram-se na Tabela 33 seguinte. A incerteza expandida foi calculada de acordo com o procedimento do subcapítulo 4.2.3.3.

Tabela 33 - Erro sobre a iluminância lida pelo luxímetro em calibração em relação ao valor referência da iluminância para cada lâmpada de trabalho

Lâmpada de trabalho	$D_{Lamp-luxi} / m$	$\varepsilon / m$	$E_{ref} / lx$	$U(E_{ref}) / lx$	$E_{luxi} / lx$	$e / lx$	$U(e) / lx$	Incerteza Expandida relativa do Erro / %
6332	3,1	- 0,033	5,21	0,02	5,0	-0,21	0,09	1,7
	2,2		10,43	0,04	10,0	-0,43	0,14	1,4
6334	2,1		51,92	0,18	54,1	2,18	0,65	1,3
	1,5		103,08	0,4	107,4	4,3	1,3	1,2
6315	1,4		502,00	1,8	518,9	16,9	6,2	1,2
	1,0		1003,30	4	1038,1	35	12	1,2

Pela da Tabela 33, uma vez que as ordens de grandezas das incertezas expandidas relativas associadas aos valores de referência de iluminância são compatíveis com as das incertezas expandidas relativas de intensidade luminosa das lâmpadas de trabalho, garantindo a validação dos resultados obtidos com o automatismo aplicado no banco fotométrico do LFR.

## 9.2 Comparação Intralaboratorial

A partir de ensaios intralaboratoriais, pretende-se comparar os resultados obtidos pela aplicação do automatismo no banco fotométrico do LFR. Para tal foi efetuado um conjunto de ensaios de modo a permitir analisar a compatibilidade metrológica e a fidelidade de medição.

### 9.2.1 Compatibilidade metrológica

Na avaliação da compatibilidade metrológica, alguns exemplos de testes que podem ser utilizados são o erro normalizado, Z-score, Z'-score, qui-quadrado [48], teste t-Student, teste de Grubbs, entre outros.

Para a avaliação da compatibilidade metrológica do automatismo foram então analisados o conjunto de resultados das calibrações referentes às intensidades luminosas deduzidas das lâmpadas padrão primário Osram Wi 41 G (NS53, NS56 e NS85) com o automatismo aplicado no LFR e comparados com o conjunto de resultados das calibrações da intensidade luminosa com o procedimento de referência, ou seja, sem o automatismo aplicado no LFR.



Para a avaliação da compatibilidade metrológica dos resultados com o automatismo foi utilizado o teste do erro normalizado ( $En$ )

Os valores do  $En$  são calculados a partir da Equação 9.1, segundo a NP ISO/IEC 17043 [48].

$$En = \frac{|x - X|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad \text{Equação 9.1}$$

Onde:

- $x$  Valor a comparar, intensidade luminosa com o automatismo aplicado
- $X$  Valor de referência da intensidade luminosa, antes da aplicação do automatismo
- $U_{lab}$  Incerteza expandida do valor a comparar
- $U_{ref}$  Incerteza expandida do valor de referência

Para o cálculo do valor a comparar e o valor referência, foram seguidos os procedimentos de calibração de lâmpadas segundo o subcapítulo 4.2.2.1. Para o cálculo das incertezas expandidas associadas, seguiu-se o Guia de expressão de Incerteza de Medição, subcapítulo 4.2.2.3.

Tabela 34 - Valores com o automatismo

$i$	Automatismo	
	$x$ / cd	$U_{lab}$ / cd
1	48,12	0,58
2	48,00	0,58
3	48,17	0,58

Tabela 35 - Valores de referência

$j$	Referência	
	$X$ / cd	$U_{ref}$ / cd
4	48,14	0,58
5	48,02	0,58
6	48,20	0,58

A partir dos resultados obtidos das calibração, Tabela 34 e Tabela 35, e a aplicação da Equação 9.1 para o cálculo do valor absoluto do erro normalizado.

- $E_{n\ 1,5} = 0,13$
- $E_{n\ 1,4} = 0,02$
- $E_{n\ 1,6} = 0,09$
- $E_{n\ 2,4} = 0,17$
- $E_{n\ 2,5} = 0,03$
- $E_{n\ 2,6} = 0,25$

- $E_{n\ 3,4} = 0,04$
- $E_{n\ 3,5} = 0,18$
- $E_{n\ 3,6} = 0,03$

O valor absoluto do erro normalizado, de todas as intensidades luminosas determinadas é inferior a 1, deste modo os resultados são considerados satisfatórios, uma vez que o valor crítico é 1 e para o resultado ser considerado satisfatório  $|E_n| \leq 1$  [48]. Numa abordagem mais precisa, conclui-se que o erro normalizado para as intensidades luminosas calculadas com a mesma lâmpada padrão, com e sem automatismo, são os menores.

### 9.2.2 Fidelidade de medição

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia [8]., a fidelidade de medição é o grau de concordância entre valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas. A fidelidade ou precisão de medição é geralmente expressa numericamente por características de medida como a dispersão, o desvio-padrão, a variância ou o coeficiente de variação, sob condições de medição especificadas. As “condições especificadas” podem ser, por exemplo, condições de repetibilidade, condições de fidelidade ou precisão intermediária ou condições de reprodutibilidade

Para o estudo em questão, efetuou-se uma análise à repetibilidade de medição com o automatismo aplicado no banco fotométrico LFR e comparou-se à repetibilidade de medição sem o automatismo.

A repetibilidade exprime a fidelidade de um método de ensaio efetuado em condições idênticas, isto é, refere-se a ensaios efetuados sobre uma mesma amostra, em condições tão estáveis quanto possível, tais como [8]:

- Mesmo laboratório
- Mesmo operador
- Mesmo sistema de medição
- Mesmo procedimento de medição
- Curtos intervalos de tempo.

Os resultados de duas medições efetuadas em condições de repetibilidade são considerados aceitáveis se  $|X_i - X_{i-1}| \leq r$ , sendo  $r$  o limite de repetibilidade.

Para se testar a fidelidade de medição, efetuaram-se três sequências medições da tensão devido à fotocorrente produzida pelo fotômetro padrão para cada lâmpada padrão primário, Osram Wi 41 G (NS53, NS56 e NS85), com o automatismo aplicado no LFR e comparados com o conjunto de

resultados das calibrações da intensidade luminosa com o procedimento de referência, ou seja, sem o automatismo aplicado no LFR.

Para um limite de confiança de 95%, o limite de repetibilidade é avaliado segundo [49]:

$$r = 2,8\sqrt{S_{ri}^2}$$

Equação 9.2

Em que:

- $r$  – Limite de repetibilidade
- $S_{ri}^2$  – Variância da repetibilidade

Para cada sequência foram estimadas as variâncias de repetibilidade segundo a Norma ISO 5725-2 [50].

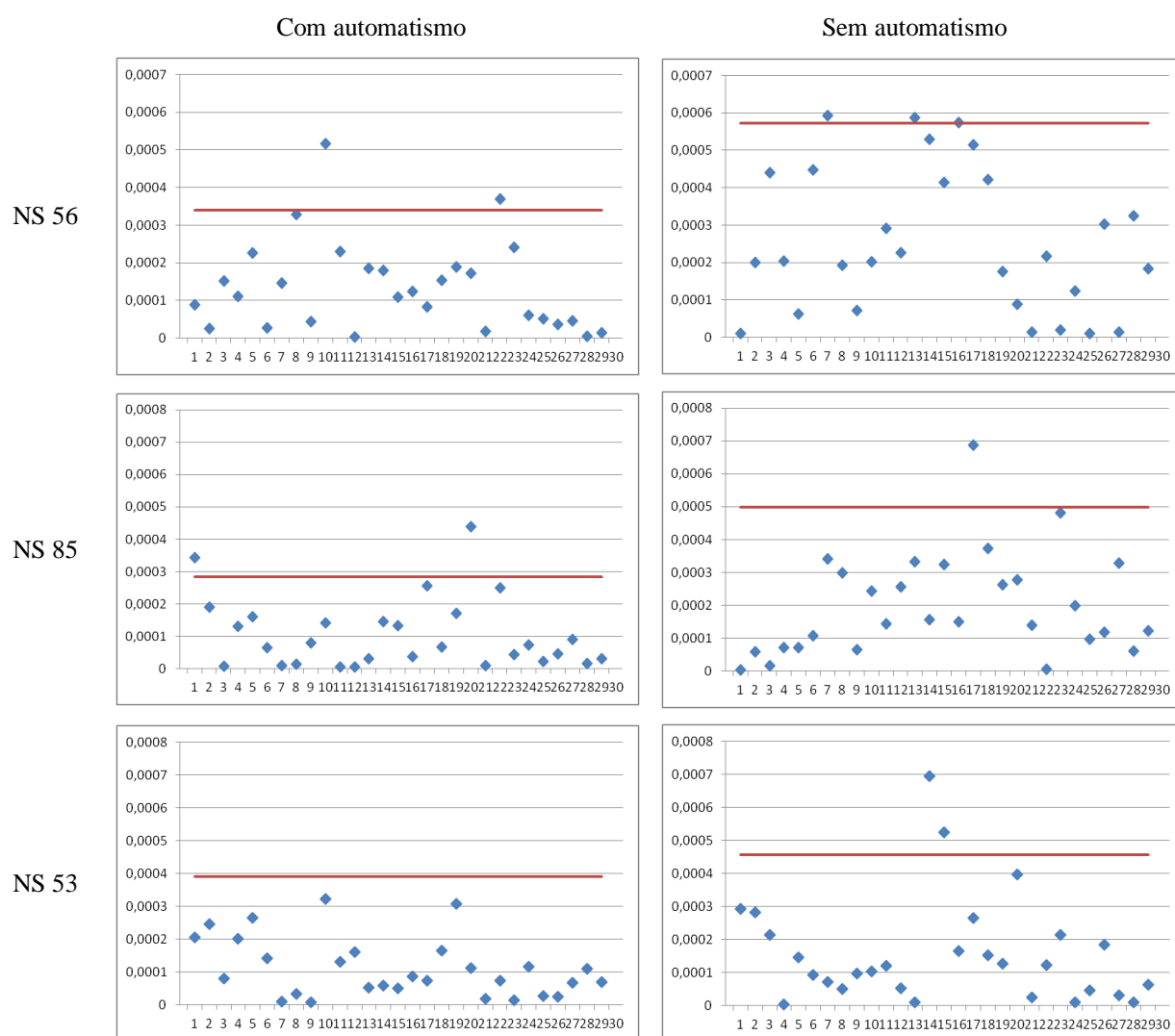


Figura 9.1- Análise da repetibilidade

A partir da observação dos gráficos da Figura 9.1, pode-se concluir que os valores da dispersão para cada lâmpada padrão nas mesmas condições de repetibilidade são mais satisfatórios nos ensaios com o automatismo no banco fotométrico do LFR. Com efeito, a Figura 9.1 evidencia que os limites de repetibilidade para os ensaios com o automatismo são sempre inferiores ao limite de repetibilidade antes da colocação do automatismo.

## 10 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

O presente trabalho procurou responder de forma adequada aos objetivos propostos que visavam a conceção e implementação de um automatismo com aplicação direta à calibração de lâmpadas e luxímetros, no Laboratório de Fotometria e Radiometria (LFR) do IPQ.

A partir da aplicação da matriz de decisão na escolha dos componentes do automatismo de modo a justificar as soluções encontradas conclui-se que componente mecânica e eletrónica revelaram-se eficazes, na medida em que todos os ensaios efetuados não apresentaram falhas na posição angular desejada.

O chassi de suporte dos componentes, revelou-se uma estrutura resistente e capaz de resistir de forma eficiente às solicitações durante o seu funcionamento.

O programa em linguagem de programação gráfica, LabVIEW, de modo a construir o programa de controlo, de abertura e fecho do componente mecânico do automatismo demonstrou ser eficiente na medida que não apresentou qualquer tipo de falha durante a sua utilização.

O objetivo proposto pela presente dissertação, inserida num estágio curricular, foi alcançado com sucesso. Pois, foi realizado um automatismo controlado remotamente de abertura e fecho de orifício de iluminação do sensor fotométrico pela lâmpada no banco fotométrico primário do LFR. Também foi proposta uma estimativa da coerência dos resultados obtidos com este automatismo em relação aos resultados obtidos manualmente e foi evidenciada uma consequente diminuição da componente de incerteza associada ao operador na obtenção das medições. Pode portanto concluir-se que o automatismo implementado acrescentou uma mais-valia aos processos de calibração do LFR.

O LFR, na procura de soluções de aperfeiçoamento dos processos de calibração e controlo metrológico, poderá ainda implementar automatismos num conjunto de tarefas de modo a automatizar todo o processo de calibração de lâmpadas e luxímetros. Mais especificamente, seria interessante a implementação de controlo por câmara de filmar e de automatismo dos processos de alinhamento do filamento da lâmpada, da superfície sensível do luxímetro, assim como no processo de calibração de luxímetros na tarefa de deslocamento do luxímetro em cada sequência de medições.



## Bibliografia

- [1] O. Pellegrino, Calibração no Laboratório Primário de Fotometria no IPQ, Caparica: Laboratório Central de Metrologia, Instituto Português da Qualidade.
- [2] IPQ, Pesos e Medidas em Portugal, Lisboa: IPQ, 1990.
- [3] N. L. Almeida, Desenvolvimento de métodos de calibração de pequenos e grandes volumes aplicados a ensaios "in situ", Lisboa, 2007.
- [4] Instituto Português da Qualidade, “ Metrologia em Síntese”, 1ª Ed , ISBN 972-763-041-3, 1º ed., Outubro 2001.
- [5] ISO, ISO 10526:1999/CIE S005/E-1998 - CIE Standard Illuminants for Colorimetry, 1999.
- [6] A. Ryer, Light Measurement Handbook, 1997.
- [7] [Online]. Available: <http://www.ipq.pt/backFiles/LFR.pdf>. [Acedido em Fevereiro 2013].
- [8] IPQ, Vocabulário Internacional de Metrologia, Caparica, 2012.
- [9] IPQ, "Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração", 2ª ed., Caparica, Novembro 2005.
- [10] M. Cox, The evaluation of key comparison data, Metrologia 39, 2002.
- [11] ISO/IEC, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements, First edition, 2008.
- [12] S. Ramalho, “Desenvolvimento do Sistema Primário para Medição da Densidade de Líquidos”, Caparica: Dissertação de Mestrado: FCT-UNL, 2007.
- [13] IPQ, NP EN ISO/IEC 17025 Requisitos gerais de competências para laboratórios de ensaio e calibração, 2º ed., 2005.
- [14] E. Filipe, H. Navas, D. Nunes, O. Pellegrino e C. Pires, "Rastreabilidade e método de avaliação no Laboratório Primário de Fotometria", 2013.
- [15] O. Pellegrino, Calibração de lâmpadas padrão secundárias de intensidade luminosa, LCM - Instituto Português da Qualidade, 2009.
- [16] CIE, "Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance", nº69 ed., CIE, 1987.
- [17] O. Pellegrino, Calibração de luxímetros, LCM - Instituto Português da Qualidade, 2011.
- [18] L. B. Palma, *Automação Industrial*, Lisboa: Universidade Nova de Lisboa - FCT - DEE, 2013.
- [19] J. Barata, *Robótica Introdução*, Caparica: Universidade Nova de Lisboa - DEE, 2012.

- [20] T. Faria, “Introdução aos Microcontroladores,” Agosto 2006. [Online]. Available: [www.lps.usp.br](http://www.lps.usp.br). [Acedido em 25 Janeiro 2013].
- [21] FEUP, “Decisão,” [Online]. Available: [http://paginas.fe.up.pt/~mac/ensino/docs/IO19992000/IO19992000T\\_decisao.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~mac/ensino/docs/IO19992000/IO19992000T_decisao.pdf). [Acedido em 11 2012].
- [22] R. Birrento, PROJECTO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO FORMULA STUDENT, FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA, 2008.
- [23] L. d. Garagem, 14 Maio 2012. [Online]. Available: <http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-sobre-tipos-de-motores-servo-motores-de-passo-e-corrente>. [Acedido em Dezembro 2012].
- [24] Farias, F. Rafael, Raunheite e T. Luís, Estudo comparativo entre Servo Motor DC e Motor de Passo, São Paulo: Escola de Eng., Universidade Presbiteriana Mackenzie.
- [25] R. G. Cruz, “Sistemas de acionamento de precisão em prensas mecânicas,” Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica, Aveiro, 2012.
- [26] R. R. Lima, Análise comparativa de estratégias de controle modernas aplicadas no controle de velocidade de um servomotor, São Caetano do Sul, 2008.
- [27] A. Santos, “Pictronics,” Agosto 2007. [Online]. Available: <http://www.pictronics.com>. [Acedido em Novembro 2012].
- [28] “inmotion,” [Online]. Available: <http://inmotion.pt/documentation/others/PHD-3000/HS322HD.pdf>. [Acedido em 1 2013].
- [29] Phidgets, “1000 - PhidgetServo 1-Motor Product Manual,” [Online]. Available: [http://www.phidgets.com/documentation/Phidgets/1000\\_0\\_Product\\_Manual.pdf](http://www.phidgets.com/documentation/Phidgets/1000_0_Product_Manual.pdf). [Acedido em 11 2012].
- [30] J. M. Tavares, CFAC: Introdução ao SolidWorks, FEUP/DEMc-SDI, 2012.
- [31] J. HEINZ e C. HERTZ, “Advances in Electronics and Electron Physics,” Orlando, Ink-Jet, 1985, pp. 91-171.
- [32] N. Rui J, S. M.S., J. L. F., T. Duarte, F. Braga e G. Cruz, “Protoclick Prototipagem Rápida,” Porto, 2000.
- [33] S. Magno, 24 Abril 2013. [Online]. Available: <http://exameinformatica.sapo.pt>. [Acedido em Agosto 2013].
- [34] S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy e P. Wright, Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, vol. 8, 2002, pp. 248 - 257.
- [35] C. Ziemian, M. Sharma e S. Ziemian, Anisotropic Mechanical Properties os ABS Parts Fabricated by fused Deposition Modelling, USA.



- [36] L. Li, Q. Sun, C. Bellehumeur e P. Gu, Composite Modeling and Analysis of FDM Prototypes for Design and, Calgary, Alberta: The University of Calgary, Canada.
- [37] J. Cardoso e P. Coelho, "Métodos Computacionais em Engenharia Mecânica", 2011: FCT/UNL.
- [38] Á. Azevedo, "Método dos Elementos Finitos", 1º Edição ed., Porto: FEUP, 2003.
- [39] J. Filipe, J. Simões e F. Cruz, Projecto PROTOMA, Setubal: EST, 2004.
- [40] L. T. Garcia, Desenvolvimento e Fabricação de uma mini impressora 3D para cerâmicas, São Carlos, 2010.
- [41] J. Rodrigues, Estudo sobre a Influência do Ficheiro STL na Obtenção de Modelos Tridimensionais, Aveiro: UA, 2010.
- [42] "ProtoPulsion Inc.," [Online]. Available: [http://www.protopulsion.com/dimension\\_apps.html](http://www.protopulsion.com/dimension_apps.html).
- [43] J. L. F e J. N. Rui, A Prototipagem rápida na Indústria Nacional, Porto: Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP.
- [44] [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/pt/>.
- [45] R. Nery, Introdução ao LabVIEW, Pará, Brasil: Universidade Federal do Pará.
- [46] M. Ramalho, "Programação Básica de LabVIEW," 2006. [Online]. Available: <https://dSPACE.ist.utl.pt>. [Acedido em Agosto 2012].
- [47] Phidget Inc., Labview Manual, Canada, 2011.
- [48] ISO/IEC, ISO/IEC 17043:2010 - Conformity assessment: General requirements for proficiency testing, Geneva: 1ª Ed., 2010.
- [49] Guia Relacre, Validação de Métodos Internos de Ensaio, Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal.
- [50] ISO, ISO 5725-2:1994 - Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method, 1994.
- [51] Bioinfo - Casa da Ciência, 31 Maio 2012. [Online]. Available: <http://bioinformaticacc.wordpress.com>. [Acedido em 2013].



# Anexos



## Anexo I

Tabela I.1 – Resultados dos ensaios de tração de *Ziemian et al.*

Orientação do filamento	Tensão de cedência / MPa	Diferença / %	Tensão de rotura / MPa	Diferença / %
Longitudinal (0°)	25,51	-5,3	25,72	-5,2
Transversal (90°)	14,35	-46,8	16,22	-40,2
Criss-cross (45°/-45°)	18,90	-29,9	19,36	-28,6

Tabela I.2 - Resultados dos ensaios de compressão de *Ziemian et al.*

Orientação do filamento	Tensão de cedência / MPa	Diferença / %	Tensão de rotura / MPa	Diferença / %
Longitudinal (0°)	28,83	-18,8	32,32	-9,7
Transversal (90°)	29,48	-17,0	34,69	-3,1
Criss-cross (45°/-45°)	28,14	-20,7	34,57	-3,4



## Anexo II

Tabela II.1- Fixação do Tipo A

Qualidade	Tamanho do elemento / mm	Tolerância / mm	Nº de elementos	Nº de nós	Tensão / MPa	Deslocamento / mm
<i>Draft</i>	6	0,3	13700	5085	7,275	0,3422
	5	0,25	15196	5672	7,096	0,3601
	4	0,2	18871	6924	6,91	0,3843
	3	0,15	27826	9706	6,994	0,4239
	2	0,1	58764	18837	8,713	0,4643
<i>High</i>	6	0,3	13700	28326	19,999	0,4856
	5	0,25	15196	31567	22,471	0,4914
	4	0,2	18871	38846	19,562	0,4977
	3	0,15	27770	55636	18,062	0,5134
	2	0,1	58764	112198	18,861	0,5199

Tabela II.2 - Fixação do Tipo B

Qualidade	Tamanho do elemento / mm	Tolerância / mm	Nº de elementos	Nº de nós	Tensão / MPa	Deslocamento / mm
<i>Draft</i>	6	0,3	13518	4994	8,558	0,585
	5	0,25	15000	5574	8,662	0,6405
	4	0,2	18677	6827	9,323	0,7143
	3	0,15	27826	9706	10,634	0,8609
	2	0,1	58764	18837	18,388	1,034
<i>High</i>	6	0,3	13700	28326	24,954	1,047
	5	0,25	15196	31567	25,264	1,065
	4	0,2	18871	38846	25,803	1,076
	3	0,15	27770	55636	25,567	1,102
	2	0,1	58764	112198	25,758	1,096

Tabela II.3 - Fixação do Tipo C

Qualidade	Tamanho do elemento / mm	Tolerância / mm	Nº de elementos	Nº de nós	Tensão / MPa	Deslocamento / mm
<i>Draft</i>	6	0,3	13518	4994	7,484	0,38
	5	0,25	15000	5574	7,277	0,4014
	4	0,2	18677	6827	7,002	0,4294
	3	0,15	27826	9706	7,146	0,4895
	2	0,1	58764	18837	8,954	0,5588
<i>High</i>	6	0,3	13700	28326	19,69	0,64
	5	0,25	15196	31567	23,481	0,6472
	4	0,2	18871	38846	19,502	0,6542
	3	0,15	27770	55636	18,427	0,6691
	2	0,1	58764	112198	19,018	0,6769





## Anexo III

Tabela III.1- Dispersão dos valores medidos

NS 56		NS 85		NS 53	
$V_{f,P} / \mu\text{V}$	Dispersão	$V_{f,P} / \mu\text{V}$	Dispersão	$V_{f,P} / \mu\text{V}$	Dispersão
1,748968	8,8E-05	1,74775	0,000343	1,751334	0,000204
1,748993	2,5E-05	1,747559	0,000191	1,751579	0,000245
1,748842	0,000151	1,747552	7E-06	1,751659	8E-05
1,748731	0,000111	1,747682	0,00013	1,751458	0,000202
1,748956	0,000225	1,747521	0,000161	1,751193	0,000265
1,748929	2,7E-05	1,747586	6,5E-05	1,751334	0,000141
1,749075	0,000146	1,747577	9E-06	1,751343	8,5E-06
1,748748	0,000328	1,747563	1,4E-05	1,751376	3,3E-05
1,748704	4,4E-05	1,747483	8E-05	1,751384	8E-06
1,749219	0,000515	1,747625	0,000142	1,751062	0,000322
1,74899	0,000229	1,74763	5E-06	1,751192	0,000131
1,748993	3E-06	1,747635	5E-06	1,751353	0,000161
1,748808	0,000185	1,747605	3E-05	1,7513	5,25E-05
1,748988	0,000179	1,74775	0,000145	1,751359	5,9E-05
1,749096	0,000108	1,747882	0,000132	1,75141	5,05E-05
1,748972	0,000124	1,747846	3,6E-05	1,751495	8,55E-05
1,748889	8,25E-05	1,747589	0,000257	1,751422	7,3E-05
1,748737	0,000153	1,747656	6,7E-05	1,751257	0,000166
1,748926	0,00019	1,747826	0,00017	1,750949	0,000308
1,748755	0,000171	1,747388	0,000438	1,750837	0,000112
1,748737	1,8E-05	1,747397	9E-06	1,750855	1,8E-05
1,749106	0,000368	1,747647	0,00025	1,750928	7,3E-05
1,748864	0,000242	1,747691	4,4E-05	1,750916	1,25E-05
1,748925	6,05E-05	1,747618	7,3E-05	1,751031	0,000115
1,748873	5,15E-05	1,747595	2,3E-05	1,751058	2,7E-05
1,748837	3,65E-05	1,747549	4,6E-05	1,751033	2,5E-05
1,748882	4,5E-05	1,747458	9,1E-05	1,7511	6,7E-05
1,748886	4,5E-06	1,747443	1,5E-05	1,750991	0,000109
1,748873	1,35E-05	1,747474	3,1E-05	1,75106	6,9E-05